



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO
AGREGADO MIÚDO POR AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE PVC
(POLICLORETO DE VINILA) EM CONCRETOS CONVENCIONAIS**

Guilherme Welzbacher

Lajeado, novembro de 2019

Guilherme Welzbacher

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO
AGREGADO MIÚDO POR AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE PVC
(POLICLORETO DE VINILA) EM CONCRETOS CONVENCIONAIS**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, na linha de formação específica em Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof.^a Ma. Débora Pedroso
Righi

Lajeado, novembro de 2019

AGRADECIMENTOS

No final de mais uma etapa de minha vida, venho através deste trabalho de conclusão agradecer e demonstrar o quanto esta caminhada me fortificou para adquirir conhecimentos e aprendizagens, para me tornar um profissional capaz de buscar a cada dia mais objetivos a serem atingidos.

Gostaria de agradecer a minha família pela paciência e apoio nos momentos mais difíceis, e pela motivação constante dos meus pais para me tornar um profissional capaz, sem perder a essência da família, que é a união em torno de um objetivo maior que é o bem-estar do outro.

Em especial gostaria de agradecer a minha orientadora, professora mestra Débora Pedroso Righi, por estar sempre pronta, mesmo nos momentos mais difíceis a me auxiliar, para me orientar nesta reta final que sempre é muito trabalhosa.

Quero agradecer aos meus professores pelos ensinamentos, pela disposição em esclarecer as minhas dúvidas sempre que surgiam.

Agradeço também ao pessoal do laboratório LATEC (Laboratório de Tecnologias da Construção) que me ajudaram na realização dos ensaios práticos.

E a todos colegas e principalmente aos amigos que fiz durante curso e que com certeza ficaram para sempre na minha vida.

.

RESUMO

Diversos estudos relacionam o aumento da degradação ambiental com a crescente extração de recursos naturais para sua utilização como matérias-primas para a construção. Em paralelo a este fato, a construção civil é o setor que mais gera resíduos, os quais, na maioria dos casos, não recebem a correta destinação. Isto deixa claro o quão relacionado estão o tema da sustentabilidade e da construção civil, sendo um grande desafio manter a harmonia entre a exploração de recursos, o seu consumo e a geração de resíduos. Dentre os resíduos gerados pela construção, pode-se mencionar o Polyvinyl Chloride ou Policloreto de Vinila (PVC). O estudo tem como objetivo verificar a influência da substituição parcial do agregado natural por resíduo de PVC moído em concretos convencionais, analisando seu desempenho quanto às propriedades físicas e mecânicas. Inicialmente, desenvolveu-se uma pesquisa acerca do tema para obter o devido embasamento sobre os resíduos de PVC, bem como, sobre o concreto e seus componentes. O programa experimental foi dividido em quatro estágios, no primeiro foram realizados os ensaios caracterização dos materiais utilizados, em seguida, foi definido o traço, na terceira etapa, dosou-se quatro traços de concreto, um de referência, sem nenhum tipo de modificação, e outros três com a substituição parcial do agregado miúdo por agregado reciclado, sendo elas nas proporções de 5%, 10% e 15%. Os resultados obtidos através dos ensaios e análises realizados permitiu concluir que a porcentagens de 5% é a mais indicada para o uso em concretos convencionais, sendo que esta obteve resultados melhores que o concreto de referência em todos os aspectos analisados. No traço com 10% de substituição, também se observou resultados positivos, ainda que estes não superem o concreto referência.

Palavras-chave: PVC. Concreto. Sustentabilidade. Agregado Reciclado. Resíduos.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processo de produção do PVC	17
Figura 2 – Principais aplicações do PVC no Brasil, em 2001	18
Figura 3 – Principais aplicações por setor da economia	19
Figura 4 – Símbolo para designar produtos de PVC	20
Figura 5 – Fluxograma da metodologia do estudo.....	29
Figura 6 – Resíduo de PVC moído.....	36
Figura 7 – Comparação do abatimento.....	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curvas de Abrams para determinação da relação de água/cimento.....	39
Gráfico 2 – Curva granulométrica do agregado miúdo natural.....	48
Gráfico 3 – Curva granulométrica do agregado graúdo natural.....	50
Gráfico 4 – Curva granulométrica do agregado miúdo reciclado.....	52
Gráfico 5 – Resistência à compressão x idade de rompimento.....	57
Gráfico 6 – Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.....	60
Gráfico 7 – Absorção de água por capilaridade x tempo.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação da areia por seu MF	24
Tabela 2 – Classificação do agregado graúdo por seu DMC	25
Tabela 3 – Parâmetros de dosagem estabelecidos.....	38
Tabela 4 – Consumo de água aproximado.....	39
Tabela 5 – Volume compactado seco (Vc) de agregado graúdo para um metro cúbico de concreto.....	40
Tabela 6 – Propriedades granulométricas do agregado miúdo natural.....	48
Tabela 7 – Propriedades granulométricas do agregado graúdo natural.....	50
Tabela 8 – Propriedades granulométricas do agregado miúdo reciclado.....	52
Tabela 9 – Absorção de água e índice de vazios.....	58
Tabela 10 – Absorção de água por capilaridade.....	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos Resíduos Sólidos	15
Quadro 2 – Primeira ocorrência e primeira produção industrial de alguns polímeros comerciais	16
Quadro 3 – Características físicas do cimento	30
Quadro 4 – Traço de referência.....	53
Quadro 5 – Traços utilizados na produção do concreto, com seu consumo em massa.....	54
Quadro 6 – Comparação do uso de aditivo com o abatimento encontrado.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Norma Técnicas

AR – Agregado reciclado

CORSAN – Companhia Riograndense de Saneamento

CP – Cimento Portland

DMC – Diâmetro Máximo Característico

ISO – Organização Internacional de Padronização

LATEC – Laboratório de Tecnologia da Construção

MVC – Monômero Cloreto de Vinila

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

PVC – Policloreto de Vinila

RCC – Resíduo de Construção Civil

RCD – Resíduo de Construções e Demolições

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Considerações iniciais	9
1.2 Objetivos	10
1.2.1 Objetivo geral	10
1.2.2 Objetivos específicos	10
1.3 Justificativa	11
1.4 Delimitações da pesquisa	11
1.5 Estrutura da pesquisa	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Sustentabilidade	13
2.2 Resíduos	14
2.3 Polímeros	15
2.3.1 História dos polímeros	15
2.3.2 PVC.....	16
2.3.3 Características e aplicações do PVC.....	18
2.3.4 Reciclagem do PVC.....	19
2.4 Concreto	21
2.4.1 Constituintes do concreto	21
2.4.2 Cimento Portland.....	22
2.4.3 Agregados.....	23
2.4.4 Água de amassamento	26
2.5 Concreto com o uso de materiais reciclados	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28

3.1 Programa Experimental	28
3.2 Materiais utilizados	29
3.2.1 Cimento	29
3.2.2. Agregado miúdo natural	31
3.2.3 Agregado graúdo.....	34
3.2.4 PVC moído	35
3.2.6 Água de amassamento	37
3.3 Determinação do traço	37
3.4 Ensaio no estado fresco	42
3.4.1 Ensaio de abatimento tronco de cone - <i>slump test</i>	42
3.5 Ensaio no estado endurecido	43
3.5.1 Resistência à compressão.....	43
3.5.2 Absorção e índice de vazios	44
3.5.3 Resistência à tração por compressão diametral.....	45
3.5.4 Absorção de água por capilaridade	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1 Caracterização dos materiais	47
4.1.1 Cimento	47
4.1.2 Agregado miúdo natural	47
4.1.2 Agregado graúdo natural	49
4.1.3 Agregado miúdo reciclado	51
4.2 Definição do traço	53
4.3 Ensaio do concreto em estado fresco	54
4.3.1 Ensaio de abatimento do tronco de cone – <i>slump test</i>	54
4.4 Ensaio do concreto em estado endurecido.....	56
4.4.1 Resistência à compressão.....	56
4.4.2 Absorção e índice de vazios	58
4.4.3 Resistência à tração por compressão diametral.....	59
4.4.4 Absorção de água por capilaridade	61
5 CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Pesquisas mostram que a geração de lixo no Brasil cresce muito mais que a população, segundo a Agência Brasil (2015) demonstrou em seu estudo que, a produção de resíduos aumentou em 29% entre 2003 e 2014, sendo que neste mesmo período, a taxa de crescimento populacional foi de 6%, o que equivale a quase cinco vezes menos. Também deve ser citado que, segundo a pesquisa, das 78,6 toneladas de resíduos gerados em 2014, a enorme quantia de 29,6 toneladas, ou 41,6% do total, foram dispostas em locais inadequados e que podem trazer riscos à saúde e ao meio ambiente.

Quando relativo à reciclagem do *Polyvinly Chloride* ou policloreto de vinila (PVC), o Instituto Brasileiro do PVC (2015), indica que conforme pesquisa realizada em 2014 a taxa de reciclagem é de apenas 17,1%. Um valor extremamente baixo, haja vista que, o PVC é um polímero 100% reciclável.

Segundo Silva (2009), deve-se sempre pensar na sustentabilidade ambiental, desta forma, utilizar os recursos pensando no futuro, pois o consumo excessivo de recursos natural acaba gerando um grande desgaste à natureza.

A sustentabilidade é um assunto que vem gradativamente fazendo parte da construção civil. As atividades deste setor sempre causaram grandes impactos ao meio ambiente, seja com a grande produção de resíduos, seja com a exploração de

recursos naturais. Agora as empresas desta esfera vêm, cada vez mais, buscando formas de se adequar a uma nova demanda, proveniente de clientes dispostos a pagar mais com a garantia de estar ajudando a natureza (CARDOSO, GALATTO e GUADAGNIN, 2014).

Cardoso, Galatto e Guadagnin (2014) ainda indicam, tanto a busca por novos materiais na indústria da construção, como a utilização dos materiais reciclados. Essas matérias-primas reutilizadas diminuem os gastos com a construção, a necessidade de se extrair recursos naturais e a poluição gerada pelo descarte incorreto dos resíduos.

Com isto, o presente trabalho buscar verificar a viabilidade da substituição parcial do agregado miúdo natural por resíduo de PVC em concretos convencionais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a viabilidade da substituição parcial do agregado miúdo natural por resíduo de PVC moído em concretos convencionais, quanto as suas propriedades físicas e mecânicas.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Caracterizar as propriedades físicas dos agregados miúdos, graúdos e reciclados;
- b) Analisar a porcentagem de substituição de agregado miúdo por PVC em 5%, 10% e 15%;
- c) Definir um traço de referência para a moldagem dos corpos de prova;
- d) Comparar os resultados do ensaio em estado fresco entre os concretos de referência e os concretos com agregados reciclados;

- e) Analisar os resultados dos testes para o estado endurecido nos concretos convencionais e naqueles onde há substituição de agregados;
- f) Realizar uma análise geral dos resultados, a fim de constatar a influência da substituição do PVC moído.

1.3 Justificativa

A justificativa pela escolha deste tema se dá pela preocupação com a proteção do meio ambiente, pois a cada dia que se passa, os sinais de degradação ambiental se tornam mais evidentes. A combinação da taxa de crescente produção de resíduos, que não recebem o destino correto, em conjunto com a possibilidade do esgotamento reservas minerais, geram a necessidade de buscar alternativas capazes de solucionar tais problemas (SILVA, 2009).

Com isto, avaliou-se a possibilidade de utilizar o resíduo de PVC, um polímero muito abundante e, que em muitos casos, não recebe o destino correto, para substituir o agregado miúdo natural no concreto, desta forma, também diminuindo a extração deste recurso natural.

1.4 Delimitações da pesquisa

A pesquisa está limitada à análise das propriedades de um concreto executado com a substituição parcial do agregado miúdo natural por PVC moído, sendo este fornecido pela empresa Pevecerca 3JG, indústria que produz tubos de PVC. Será determinado um traço de referência com uso do método ABCP, a partir do qual, serão dosados um concreto de referência e três com substituição pelo agregado reciclado, sendo elas nas proporções de 5%, 10% e 15%. Para a execução das amostras, foi utilizado o cimento CP V – ARI, brita nº 0 e areia fina, além do PVC moído.

1.5 Estrutura da pesquisa

O presente trabalho foi dividido em cinco capítulos, conforme visto a seguir.

No capítulo 1, foi feita uma breve introdução ao tema da pesquisa, a apresentação dos objetivos gerais e específicos, a justificativa para a realização do trabalho, suas delimitações e a estruturação do trabalho.

O segundo capítulo exibe uma revisão bibliográfica utilizada como embasamento para o tema proposto. Nela foram abordados assuntos relevantes à contextualização, desenvolvimento e execução do trabalho.

No terceiro capítulo, encontra-se a apresentação e descrição dos materiais utilizados na pesquisa, assim como, os métodos empregados para obtenção dos resultados necessários.

O quarto capítulo apresenta o cronograma das atividades a serem desenvolvidas nas próximas etapas da pesquisa.

No quinto e último capítulo, tem-se uma breve discussão sobre os resultados que são esperados para este trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o assunto estudado, abrangendo definições importantes para a fundamentação do tema selecionado para o trabalho.

2.1 Sustentabilidade

Segundo Neta (2011), no último século, a nossa civilização passou por um enorme processo de transformação cultural, quando o fator de análise do nível de desenvolvimento e crescimento econômico da humanidade passou a ser o universo do consumo. Este acréscimo do consumo, combinado com o aumento da população mundial e da industrialização, tem culminado em danos graves ao meio ambiente, devido às grandes quantidades de resíduos gerados. Outro ponto a ser observado, é a exploração desenfreada dos recursos naturais, que em sua maioria não são renováveis, vem agravando este problema.

Cavalcanti (2003) defende que a natureza tem a capacidade de se restaurar diante das degradações sofridas, porém para tal, é necessário que exista um equilíbrio nas perturbações causadas pela humanidade. Contudo, o que se tem atualmente é uma rota de colisão entre a natureza e o homem, não havendo, aparentemente, nenhuma possibilidade de recuperação do meio ambiente, se este ritmo for mantido.

Dada esta situação, é cada vez maior a necessidade de se buscar soluções que agredam menos a natureza, que promovam redução do consumo na fonte e aumentem a reutilização de materiais (NETA, 2011).

Segundo a definição de Cavalcanti (2003), a sustentabilidade se resume em atingir um ponto de harmonia entre a natureza e o homem. Com isso, haveria a possibilidade de se obter condições de vida iguais ou melhores, às pessoas que aqui habitam e aos seus sucessores, deste modo, continuamente.

Trigueiro (2005, apud Silva, 2009) adiciona ao conceito de sustentabilidade, a “comunidade sustentável” que é aquela capaz de suprir suas necessidades sem diminuir as oportunidades das gerações futuras.

Para atingir-se a sustentabilidade deve-se executar os trabalhos de forma responsável, de modo que estas atitudes venham a proporcionar um desenvolvimento sustentável. Estas atitudes não devem visar apenas o progresso econômico, mas também focar na proteção do meio ambiente, para que com isso, seja garantida a qualidade de vida a longo prazo (PAES, 2011).

2.2 Resíduos

Pela definição da norma da NBR 10004 (ABNT, 2014), resíduos sólidos são aqueles que:

Resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções, técnica e economicamente, inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT; NBR 10004, 2004, p1).

Com isso, pode-se notar a grande diferença e a dificuldade em identificar um resíduo, visto que suas características químicas, física e biológicas apresentam variações conforme a atividade ou fonte geradora.

Desta forma, a NBR 10004 (ABNT, 2004) criou um quadro de classificação baseado em análises das características dos resíduos, tem-se quatro classes, como visto no quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos Resíduos Sólidos

Classes	Condição
I	Perigosos
II	Não Perigosos
IIA	Não Perigosos e Não Inerentes
IIB	Não Perigosos e Inerentes

Fonte: Adaptado de NBR 10004 (ABNT, 2004)

2.3 Polímeros

2.3.1 História dos polímeros

Micherepe (2016) data a primeira notícia acerca de matérias plásticas ao ano de 1869, onde um concurso, que visava substituir o marfim utilizado nas bolas de bilhar por um material sintético, acabou descobrindo o *celulóide*. Já em 1897, outro concurso, desta vez, buscando um material branco para substituir os “quadros negros”, levou a descoberta da *galatite*.

Já no século XX, mais precisamente em 1912, Leo Barkeland criou a baquelite, o primeiro polímero sintético, que foi muito utilizado na fabricação de peças para automóveis. Na década de 30, o náilon foi produzido por Wallace Carruthers, material muito leve e durável, que é amplamente utilizado ainda hoje (CANEVAROLO, 2006).

Estes primeiros polímeros demoraram a alcançar conhecimento do grande público. Porém, depois da Segunda Guerra Mundial, houve uma necessidade crescente por estas matérias plásticas, que, juntamente com o aprimoramento das indústrias na época, permitiu a criação de novos polímeros e os inserir no uso cotidiano das pessoas (MICHEREPE, 2016).

Canevarolo (2006) afirma que a ciência dos polímeros é muito recente se comparada aos materiais mais tradicionais, como cerâmicas e metais. A partir do Quadro 2, pode-se compreender, ainda que de forma resumida, a evolução dos principais polímeros comerciais.

Quadro 2 - Primeira ocorrência e primeira produção industrial de alguns polímeros comerciais

Polímero	1ª Ocorrência	1ª Produção industrial
PVC	1915	1933
PS	1900	1936/7
PEBD (LDPE)	1933	1939
Nylon	1930	1940
PEAD (HDPE)	1953	1955
PP	1954	1959
PC	1953	1958

Fonte: Adaptado de CANEVAROLO (2006)

Diversos pesquisadores da área de polímeros vêm trabalhando em pesquisas, que visam o desenvolvimento de novos polímeros sintéticos, os quais possuam propriedades para ampliar os campos de atuação deste material já amplamente difundido (HAGE JUNIOR, 1998).

2.3.2 PVC

Os primeiros passos na história do PVC remontam de 1835, quando Justus von Liebig descobriu o monômero cloreto de vinila (MVC). Porém, foi somente em 1915, que Fritz Klatte descobriu um processo de polimerização do MVC e obtenção do PVC, desta forma, buscou uma maneira de produzir tal material de forma comercial. Na época, Klatte trabalhava na indústria alemã, Chemische Fabrik Griesheim-Elektron, que buscou arduamente construir equipamentos para processar o PVC, visto que dispunham de muita matéria prima para sua produção. Contudo não obteve sucesso

nessa tarefa, que a levou a perder diversas patentes e abrir caminho para que outras empresas passassem a tentar tal produção (RODOLFO Jr.; NUNES; ORMANJI, 2002).

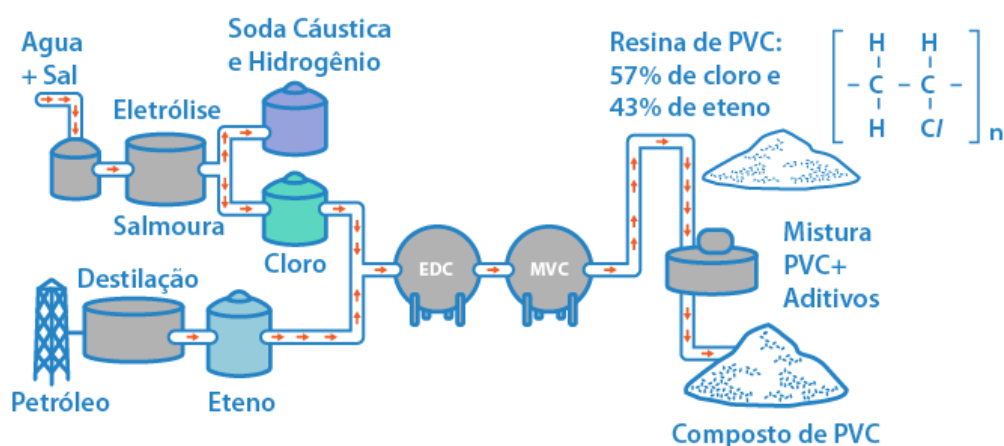
Conforme Rodolfo Jr, Nunes e Ormanji (2002), o início da produção comercial se deu na década de 30, quando a americana, B. F. Goodrich, descobriu aditivos que tornavam sua produção viável. Já no Brasil, a fabricação do PVC iniciou-se em 1954, em uma parceria entre a B. F. Goodrich e as Indústrias Químicas Matarazzo.

Segundo Micherepe (2016), o Policloreto de Vinila (PVC) é o polímero mais fabricado e mais consumido da atualidade, conseqüentemente, também é o que possui mais possibilidades de aplicações na construção civil.

O PVC é constituído por, aproximadamente, 57% de Cloro, que provem de um processo de eletrólise realizado com sal marinho, e 43% de Eteno, derivado do petróleo. A adição de alguns componentes a sua formula, como plastificantes, estabilizadores, pigmentos e lubrificantes, modificam suas características, por exemplo, baixa ou alta densidade, flexíveis ou rígidos, opaco ou transparente, brilhante ou fosco, colorido ou não, desta forma, se adaptando os seus diversos usos (ANDRADE, 2002).

O Instituto Brasileiro do PVC (2019), descreve o processo de produção do PVC conforme a Figura 1, que ilustra as etapas de produção.

Figura 1 – Processo de produção do PVC

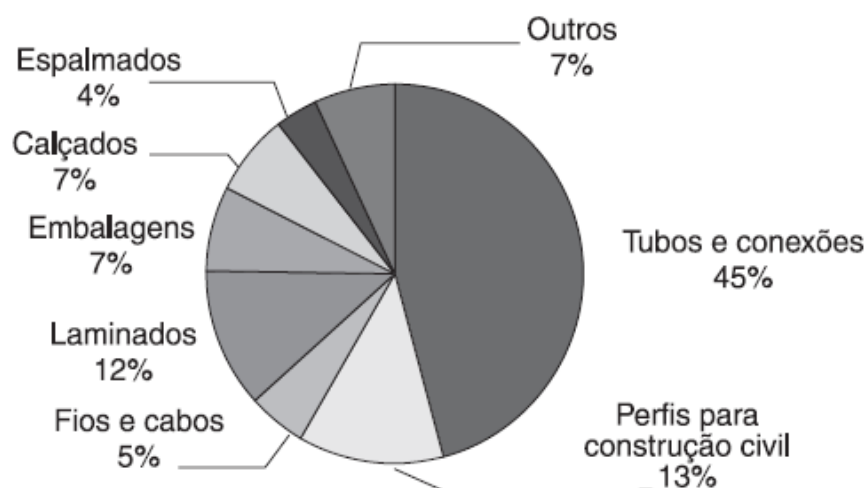


Fonte: Instituto Brasileiro do PVC (2019)

2.3.3 Características e aplicações do PVC

Dentre os polímeros, o PVC é o que apresenta maior versatilidade, devido à necessidade de acrescentar aditivos na sua fabricação, deste modo, um amplo espectro de propriedades podem ser modificadas em serventia de sua aplicação. Rodolfo Jr, Nunes e Ormanji (2002, p. 10) mencionam suas aplicações “[...] que vão desde tubos e perfis rígidos para uso na Construção Civil até brinquedos e laminados flexíveis para acondicionamento de sangue e plasma”. A Figura 2 demonstra os principais mercados do PVC, no Brasil.

Figura 2 – Principais aplicações do PVC no Brasil, em 2001



Fonte: Rodolfo Jr, Nunes e Ormanji (2002)

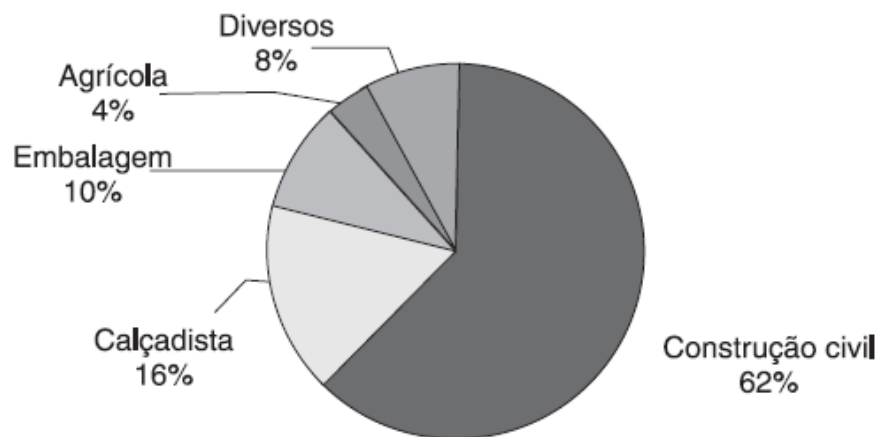
As principais características do PVC são: o bom isolamento elétrico, térmico e acústico; boa resistência à oxidação e à corrosão; baixa permeabilidade a gases e líquidos; baixo consumo energético na fabricação; baixa combustibilidade e autoextinção de chamas (ANDRADE, 2002).

Andrade (2002) enfatiza que não há um “PVC padrão”, todavia, o PVC mais tradicional é um material largamente utilizado na Construção Civil.

Na Engenharia Civil, o PVC extrudado é utilizado para fabricação de tubulações, perfis de janelas, revestimentos de cabos, entre outros materiais. Já os produtos em PVC flexível são empregados como isolamento elétrico devido à baixa condutividade (ANDRADE, 2002, p. 1283).

A Figura 3, exemplifica os principais setores onde o PVC é utilizado no Brasil.

Figura 3 – Principais aplicações por setor da economia



Fonte: Rodolfo Jr, Nunes e Ormanji (2002)

2.3.4 Reciclagem do PVC

No Brasil, a reciclagem de materiais plásticos é regulada pela norma NBR 13230 (ABNT, 2008), que apresenta uma identificação, que segue a codificação mundial, para facilitar sua seleção no processo de reciclagem. Esta simbologia pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 – Símbolo para designar produtos de PVC



Fonte: NBR 13230 (ABNT, 2008)

Conforme Piva, Neto e Wiebeck (1999), os plásticos correspondem a apenas 5% dos resíduos sólidos urbanos, dentro dos quais, 6% corresponde ao PVC, ou seja aproximadamente 0,3% do total dos resíduos produzidos. Esta baixa produção de rejeitos se deve ao longo ciclo de vida do material, segundo Rodolfo Jr, Nunes e Ormanji (2002), 42% dos produtos de PVC duram entre 20 e 100 anos, 26% entre 10 e 20 anos, 17% entre 2 e 10 anos, e apenas 15% das peças têm vida útil inferior a 2 anos.

Porém um ponto importante a ser ressaltado é que no Brasil, segundo o Instituto Brasileiro do PVC (2015), apenas 17,1% deste resíduo é reutilizado. O restante desse material não pode ser incinerado, haja vista, que a sua queima pode produzir gases altamente letais. Desta forma, estes rejeitos acabam sendo descartados em aterros sanitários, em sua maioria (CANTO, 1995).

Conforme Canto (1995), uma das maiores qualidades do PVC, se torna um dos seus maiores problemas, quando analisado como resíduo, o seu longo ciclo de vida se reflete no grande período necessário para sua degradação completa nos aterros. Assim, a única solução para corrigir este problema é aumentar os níveis de reciclagem, que para o PVC pode chegar próximo a 100%.

A reciclagem dos produtos de PVC podem ocorrer de três formas: a reciclagem mecânica, onde os resíduos são moídos e transformados em grânulos que podem ser utilizados novamente como matéria prima para a indústria; a reciclagem química, que utiliza de processos tecnológicos para transformar o rejeito em matéria prima petroquímica, que pode ser utilizado na fabricação de novos polímeros; e a reciclagem

energética, onde o resíduo é incinerado, de modo a gerar energia térmica que é transformada em elétrica (RODOLFO Jr.; NUNES; ORMANJI, 2002).

2.4 Concreto

Mehta e Monteiro (2014) citam, que o concreto é um dos materiais mais consumidos pela humanidade, sendo que fica atrás apenas da água. Na construção civil o seu uso pode ser muito diversificado, desde obras convencionais e pavimentações, até os enormes arranha-céus e obras de arte especiais. Os materiais que compõem o concreto são de fácil obtenção em praticamente todo o globo, seu custo de execução é considerado baixo, apresenta bom desempenho e resistência sob a influência das intempéries climáticas, e tem como sua maior facilidade a moldabilidade, pois é possível adquirir as mais diversas formas e dimensões, devido a sua característica plástica enquanto no seu estado fresco.

A definição de Allen e Iano (2013, p. 996) para concreto é:

“[...] um material pétreo obtido pelo endurecimento da mistura de agregados miúdos e graúdos, cimento Portland e água. Os agregados graúdos são usualmente o cascalho, o seixo ou a pedra britada e o agregado miúdo é a areia. O cimento Portland, também referido a partir deste ponto simplesmente como “cimento”, é um pó fino e cinzento. ”

Neville e Brooks (2013) acrescentam que o concreto pode ter várias características modificadas devido a alterações em sua composição, como as adições de escória de alto-forno, sílica ativa, cinza volante, uso de agregados de Resíduos de Construções e Demolições (RCD), fibras, polímeros entre outros.

2.4.1 Constituintes do concreto

Mehta e Monteiro (2014) apresentam como sendo os constituintes básicos do concreto: o aglomerante, composto formado com a mistura de cimento hidráulico e água, tem como funções aglutinar as partículas do concreto, fornecer trabalhabilidade

em estado fresco e, posterior, endurecimento no estágio final; o agregado miúdo, que é um material granular com partículas menores que 7,75mm, tem como principais obrigações preencher os vazios dentro do concreto e transmitir às tensões entre todos os constituintes; e o agregado graúdo, que também é um material granular, porém com partículas maiores que 4,75mm, suas funções são proporcionar maior volume ao concreto e garantir a maior resistência possível.

2.4.2 Cimento Portland

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (2019), o nome cimento é originário do latim *caementu*, um tipo de pedra natural muito utilizada na Roma Antiga. Porém o cimento Portland que se conhece hoje, que é dos materiais mais utilizados em todo o mundo, por ser o principal constituinte do concreto, remota de 1824, quando o construtor inglês, Joseph Aspdin, criou um pó fino proveniente da queima de argila com pedras calcárias. Joseph percebeu que este pó somente reagia quando em contato com água e que, após secar, endurecia tanto quanto as pedras que ele utilizava em suas construções. Ao patentear sua criação, ele utilizou o nome Portland, pois depois de endurecido o material tinha cor e durabilidade semelhantes as rochas encontradas em Portland, uma ilha britânica.

O cimento Portland é, por definição, um aglomerante hidráulico obtido através da pulverização clínqueres, com gesso e adições normatizadas. Clínquer é um material em forma de nódulos, produzido a partir da mistura de argila, calcário e ferro. O cimento Portland tem como componentes fundamentais: a cal (CaO), a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3), o óxido de ferro (Fe_2O_3) e uma certa proporção de magnésia (MgO) (METHA; MONTEIRO, 2014).

O cimento Portland possui várias classificações no mercado, que são definidas conforme suas adições. São estas classificações: CP I – Cimento Portland Comum; CP II – Cimento Portland Composto; CP III – Cimento Portland de Alto-Forno; CP IV – Cimento Portland Pozolânico; e CP V-ARI – Cimento de Alta Resistência Inicial (ABCP, 2019).

2.4.3 Agregados

Conforme Mehta e Monteiro (2014), agregados são materiais inertes, consequentemente, não apresentam reações químicas quando em contato com a água, e relativamente baratos, por isso são amplamente utilizados com material de preenchimento no concreto. Porém o uso destes materiais também traz maior resistência ao concreto, minimiza o seu processo de retração e dificulta o desenvolvimento de fissuras no estado endurecido.

Albuquerque (2016) apresenta as seguintes formas de classificação para os agregados:

- Segundo a origem: os Naturais, que são aqueles encontrados na natureza, como o cascalho e a areia; os Industrializados, aqueles que são obtidos através de processos industriais, como a escória de alto-forno e os agregados reciclados.
- Segundo as dimensões das partículas: os miúdos, como a areia; graúdos, como as britas e cascalhos.
- Segundo o peso específico aparente: os leves, como a argila expandida; médios, como a pedra britada; pesados, como a hematita britada.

2.4.3.1 Agregados miúdos

A norma NBR 7211 (ABNT,2009) descreve agregado miúdo como sendo aquele, cujos grãos conseguem passar pela peneira de 4,75mm, e que em concretos convencionais, normalmente é a areia.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a principal função do agregado miúdo é preencher os espaços vazios no concreto, presentes entre os agregados graúdos. O uso deste material é muito importante no custo do concreto, visto que o cimento é o material mais caro. Deste modo, ao se dosar o concreto com a quantidade correta de cimento e ampliar a quantidade deste agregado, se tem um concreto com baixo valor e boa qualidade.

Ambrozewicz (2012) indica que a classificação deste tipo de agregado é feita através de seu Módulo de Finura (MF), visto na Tabela1, sendo este, obtido pelo ensaio de granulometria.

Tabela 1 – Classificação da areia por seu MF.

Módulo de Finura			
Muito fina	de	1,35	a 2,25
Fina	de	1,71	a 2,85
Média	de	2,11	a 3,38
Grossa	de	2,71	a 4,02

Fonte: adaptado de AMBROZEWICZ (2012, p. 51)

2.4.3.2 Agregados graúdos

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), o agregado graúdo é o material, cujas partículas ficam retidas na peneira de abertura 4,75mm e passa na peneira com malha de 75mm.

Normalmente a brita é o material mais utilizado com agregado graúdo em concretos convencionais. Este material pode apresentar diversos formatos e espessuras, por isso, deve ocorrer uma seleção deste tipo de agregado, a fim de modificar relação de consumo de água e cimento e sua trabalhabilidade. Além de diminuir o consumo de cimento no concreto, tem a função de diminuir a retração do concreto e garantir sua resistência (FARIAS; PALMEIRA, 2007).

A classificação do agregado graúdo, segundo Ambrozewicz (2012), é dada pelo seu Diâmetro Máximo Característico (DMC), obtido através de sua granulometria, conforme pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação do agregado graúdo por seu DMC.

Diâmetro Máximo Característico				
Brita 0	4,8	mm	a	9,5 mm
Brita 1	9,5	mm	a	19 mm
Brita 2	19	mm	a	25 mm
Brita 3	25	mm	a	38 mm
Brita 4	38	mm	a	76 mm

Fonte: Adaptado de AMBROZEWICZ (2012, p. 47)

2.4.3.3 Agregados reciclados

Agregado Reciclado (AR) é definido pela norma NBR 9935 (ABNT, 2011) como: “material granular obtido de processos de reciclagem de rejeitos ou subprodutos de produção industrial, mineração ou construção ou demolição da construção civil, incluindo agregados recuperados de concreto fresco por lavagem, para uso como agregado”.

Segundo Holderbaum (2009, apud Gelain, 2014), compreende-se como Resíduos da Construção Civil (RCC) todo o material decorrente de obras, desde plásticos e solos até sobras de cerâmicas e argamassas, sendo que grande parte destes materiais têm elevado potencial de reciclagem como agregados. A produção de RCC no Brasil é muito grande, porém a utilização como agregado na fabricação de concretos é praticamente inexistente, sendo que do material que é efetivamente reutilizado, boa parte é destinada a aterros e sub-bases de vias.

Troian (2010) defende a utilização de agregados reciclados, pois esta proporciona diversos ganhos quanto a sua utilização como material de construção. Estas vantagens são observadas no aspecto ambiental da utilização, pois reduz consideravelmente a taxa de extração de matérias-primas naturais, e proporciona a reutilização de um material que provavelmente não iria receber o destino correto. Também é citada a vantagem econômica deste material, pois apresenta menor custo de produção, ainda, deve ser ressaltado que se corretamente aplicado, pode-se ter um concreto que apresenta ótimo desempenho.

A maior dificuldade na implantação de produtos produzidos com uso de AR no Brasil, é superar as barreiras impostas pelo setor da construção civil, que ainda é muito conservador. Porém deve-se buscar alternativas com novas aplicações, que demonstre atributos competitivos sobre os produtos convencionais. Espera-se que desta forma consiga-se alcançar as taxas de reciclagem vistas em outros países mais desenvolvidos (VIERA; DAL MOLIN, 2004).

Nos países europeus, precursores da reciclagem de resíduos de construção e demolição, o concreto reciclado já está sendo utilizado em concreto armado para casas residenciais de médio padrão e portos marítimos, e até em concretos de alta resistência (VIEIRA; DAL MOLIN, 2004).

2.4.4 Água de amassamento

A água de amassamento tem um papel fundamental na execução do concreto, visto que, é ela quem proporciona a hidratação do cimento, gerando uma reação química responsável pela característica de pega e endurecimento. Ainda, deve-se levar em consideração a qualidade da água, sendo que deve ser de mesma qualidade da fornecida à população, pois a utilização de água não tratada, que possui impurezas, irá afetar a qualidade final do concreto e favorecer a manifestação de patologias (METHA; MONTEIRO, 2014).

Silva (2004) acrescenta, que a água também é responsável pela lubrificação dos compósitos do concreto, garantindo assim, sua trabalhabilidade. A dosagem de água deve ser precisa, pois quando utilizada em excesso, causa o aumento do número de vazios e, conseqüentemente, tem-se uma redução na resistência do material. Da mesma forma, que quando a quantidade de água utilizada não for suficiente, não haverá a hidratação de todos componentes.

2.5 Concreto com o uso de materiais reciclados

Atualmente diversos estudos vêm sendo desenvolvidos, tanto no Brasil quanto no exterior, como o propósito de estudar artefatos de concreto com materiais

reciclados, sempre buscando encontrar alternativas que colaborem com um desenvolvimento sustentável.

Modro (2008) desenvolveu sua pesquisa com substituição parcial do agregado miúdo por Politereftalato de Etileno (PET) em 10%, 20%, 30% e 40%, em concretos convencionais. Em seus ensaios obteve uma pequena queda de resistência à compressão em 10% de substituição se comparado ao concreto referência, porém para as outras porcentagens, a queda na resistência foi abrupta. Sua conclusão foi de que este concreto somente poderia ser utilizado para fins não estruturais.

Pietrobelli (2010) também utilizou PET reciclado como agregado miúdo, nas proporções de 15%, 30% e 45% em substituição de massa de areia. Seus resultados apresentaram redução significativa da resistência com o acréscimo de agregado reciclado. A conclusão foi que esta redução na resistência se deu devido à diferença de massa específica do agregado reciclado e do natural, fator que não foi levado em consideração na dosagem, tornando o volume de PET bastante elevado nos traços de substituição.

Já Jardim (2016) comparou seu concreto de referência com dois traços de substituição, 10% e 15% do volume de agregado miúdo natural por agregado reciclado de PET. Tanto resistência à compressão, quanto à tração não obtiveram decréscimo ou acréscimo significativo. Este dado permitiu a conclusão de que o PET pode sim ser utilizado como agregado reciclado em concretos convencionais, considerando não há grandes alterações em suas propriedades físicas.

Em seu trabalho Ferrari (2017) estudou a possibilidade da substituição de areia por PVC em peças concreto para pavimentação. Em sua pesquisa, ela utilizou PVC proveniente de eletrodutos, e ao fazer uma análise microscópica do material, encontrou uma superfície rugosa, fato esse que possibilitou uma boa ligação com a matriz cimentícia. Desta forma, seus resultados foram positivos, obtendo resistências para 5% e 10% de substituição superiores a encontrada no traço de referência.

Já Kou et al (2009), não obteve resultados tão positivos para sua pesquisa, onde substituiu parte do agregado miúdo natural por resíduos de tubos de PVC moídos. Seus principais resultados apontaram uma redução gradual da resistência conforme era adicionado o PVC e também destacou redução notável na trabalhabilidade do concreto.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo do trabalho estão descritos os materiais e métodos utilizados para realizar os testes e ensaios necessários, para com isso, obter os resultados para avaliar o concreto com a adição de resíduo de PVC.

3.1 Programa Experimental

O programa experimental foi dividido em quatro etapas: caracterização dos materiais, a definição do traço, concretagem com a substituição do agregado e execução dos ensaios com o concreto obtido. Este programa pode ser observado na Figura 5.

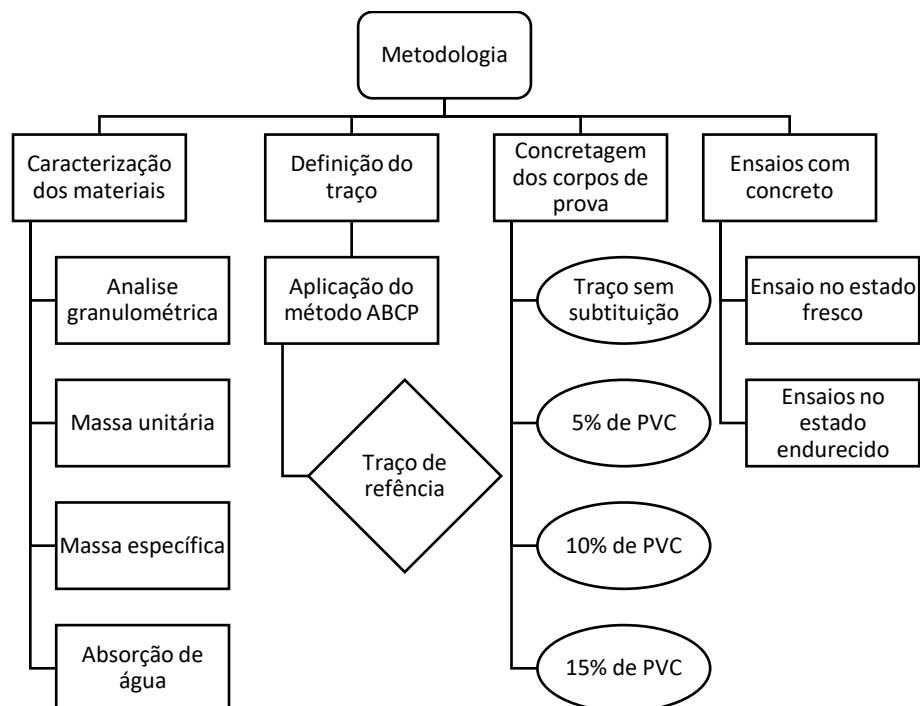
Na primeira etapa foram realizados os ensaios de caracterização dos materiais utilizados neste trabalho, sejam eles agregados reciclados ou convencionais. Os ensaios que foram realizados são granulometria, massa unitária, massa específica e absorção de água. Com estes ensaios se teve os parâmetros necessários para a próxima etapa.

A segunda etapa consistiu na análise de um traço de referência, o qual, foi obtido através do método ABCP (Rodrigues, 1998). Este traço foi o parâmetro de comparação entre os resultados obtidos do concreto com substituição.

A terceira etapa foi destinada a concretagem de corpos de prova, tanto do traço referência, quando com os traços com substituição por agregado reciclado. Foram realizados três traços com substituição, 5%, 10% e 15% em volume de areia.

Na quarta e última etapa, foi executado o ensaio com o concreto fresco, abatimento de tronco de cone. Ainda nesta etapa, foram feitos os testes com o concreto em estado endurecido: resistência à compressão, absorção e índice de vazios, resistência à tração por compressão diametral e absorção de água por capilaridade.

Figura 5 – Fluxograma da metodologia do estudo



Fonte: Do autor (2019).

3.2 Materiais utilizados

Aqui estão apresentados os materiais utilizados na pesquisa, assim como uma breve caracterização dos mesmos.

3.2.1 Cimento

O aglomerante utilizado na produção dos corpos de prova foi o cimento Portland CP V - ARI, devido a sua alta resistência inicial, que trouxe grande agilidade

ao se efetuar os ensaios necessários. Esta elevada resistência observada nas primeiras idades do concreto, pode ser observada na Quadro 3, que mostra resultados obtidos em ensaios realizados pela fabricante, e sua comparação com as especificações da norma.

Quadro 3 - Características físicas do cimento

Ensaio	Itambé	NBR 5733
Finura (resíduo na peneira 200)	0,46%	6%
Tempo de início da pega	2 h 37 min	Superior a 1 hora
Tempo de fim da pega	3 h 14 min	Inferior a 10 horas
Perda ao fogo	2,89%	4,50%
Resistência à compressão	1 dia - 22,4 Mpa	1 dia - 14 Mpa
	3 dias - 37,7 Mpa	3 dias - 24 Mpa
	7 dias - 43,0 Mpa	7 dias - 34 Mpa
	28 dias - 51,2 Mpa	28 dias - Não previsto

Fonte: Adaptado de Itambé (2015) e NBR 5733 (ABNT 1991)

3.2.1.1 Massa específica do cimento

O fabricante Itambé (2015) fornece a informação de massa específica média para o cimento Portland CP V – ARI de 3,12 g/cm³. Porém para a obtenção de melhores resultados, a massa específica do cimento foi determinada pela NBR 16605 (ABNT, 2017).

O ensaio da NBR 16605 (ABNT, 2017), se resume em preencher um frasco de Le Chateller com querosene até uma medida determinada, registra-se a massa do conjunto (frasco + líquido), após é introduzida uma amostra do cimento até atingir outra medida pré-determinada, novamente, o peso é registrado. Por fim, utilizou-se a Fórmula 1 para calcular a massa específica.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Onde:

ρ – massa específica do cimento (g/cm³)

m – massa do material ensaio (g)

V – volume de deslocamento pela massa do material ensaiado (cm³)

3.2.2. Agregado miúdo natural

Para a realização da pesquisa foi utilizado uma areia fina como agregado miúdo na confecção dos corpos de prova. Este material é fornecido pelo Laboratório de Tecnologia da Construção (LATEC) e tem sua origem natural, proveniente da região do Vale do Taquari/RS. Os ensaios a seguir foram realizados a fim de caracterizar esta areia.

3.2.2.1 Análise granulométrica do agregado miúdo

A partir das prescrições da norma NBR 248 (ABNT, 2003) foi determinada a composição granulométrica do agregado miúdo. Inicialmente utilizou-se os procedimentos de obtenção de duas amostras, prescritos na NBR NM 27 (ABNT, 2011) com o objetivo de ter-se uma amostra homogeneizada.

Em seguida, a norma indica o uso de uma série de peneiras, cujas aberturas estão previstas na NM-ISO 3310-1 (ABNT, 1996). Colocou-se a amostra na peneira superior e se agita o conjunto, para que o material fique retido em cada granulometria, assim, se mediu a massa retida em cada peneira e se define a curva granulométrica.

3.2.2.2 Massa unitária do agregado miúdo

Com base na NBR 45 (ABNT, 2006), foi determinada a massa unitária do agregado miúdo. Essa norma instituiu que o um recipiente fosse preenchido com uma amostra, obtida conforme a NBR NM 27 (ABNT, 2011), até que esse transborde, em

seguida, nivelou-se o material pelas bordas do recipiente. Registrou-se a massa do conjunto e realizou-se o cálculo, utilizando a Fórmula 2 descrita abaixo.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (2)$$

Onde:

ρ_{ap} – massa unitária do agregado (g/cm³)

m_{ar} – massa do recipiente mais o agregado (g)

m_r – massa do recipiente vazio (g)

V – volume do recipiente (cm³)

3.2.2.3 Massa específica do agregado miúdo

A NBR NM 52 (ABNT, 2003) foi utilizada para determinar a massa específica do agregado miúdo. Para iniciar, separou-se 1 kg de amostra do agregado, depois colocou-se essa amostra na água por 24 h e, posteriormente, pôs-se para secar sob ação do vento. Com a amostra seca, colocou-se no molde tronco-cônico, compactando com 25 golpes suaves, após, é aguardado que o material desmorone quando retirado o molde.

Pesou-se 500 g desta amostra, colocando-a em um frasco e pesando o conjunto. Em seguida, colocou-se aproximadamente 500 ml de água no frasco, deixou-se o material repousando por 1 h, após completou-se com água até a marca de 500 cm³ e, novamente, pesou-se o conjunto. Retirou-se o material do frasco, secou-se em estufa a 105 °C, resfriou-se a temperatura ambiente e o pesou. Calculou-se a massa específica com a Fórmula 3.

$$d = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (3)$$

Onde:

d – massa específica do agregado (g/cm^3)

m – massa da amostra seca em estufa (g)

m_s – massa da amostra em condição saturada (g)

V – volume do frasco (cm^3)

V_a – volume de água adicionado ao frasco (cm^3)

ρ_a – massa específica da água (g/cm^3)

3.2.2.4 Absorção de água do agregado miúdo

A norma NBR NM 30 (ABNT 2001) foi utilizada para determinar a absorção de água pelo agregado miúdo. Esta norma, prescreve que deve-se colocar 1 kg de amostra em um recipiente, cobrir a amostra com água e deixar descansar por 24 h. Posteriormente, deixou-se secar sob a ação do vento. A amostra seca, foi colocada no molde troco-cônico e foi suavemente compactada com 25 golpes, este processo foi realizado até que desmorone, sob a condição que não seja na primeira retirada do molde. Por fim, determinou-se a absorção de água com a Fórmula 4.

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

A – absorção de água (%)

m – massa da amostra seca em estufa (g)

m_s – massa da amostra em condição saturada (g)

3.2.3 Agregado graúdo

Para os ensaios deste trabalho utilizou-se como agregado graúdo a brita tipo 0, de origem basáltica que é normalmente extraída na região do estudo. Este material é fornecido pelo LATEC e tem suas dimensões entre 4,8 mm e 9,5 mm.

3.2.3.1 Análise granulométrica do agregado graúdo

Para essa análise seguiu-se a norma NBR 248 (ABNT, 2003), a mesma utilizada para determinação da granulometria do agregado miúdo, com isso, os passos seguidos são os mesmos descritos no item 3.2.2.1. Por fim, teve-se uma curva granulométrica para o agregado graúdo.

3.2.3.2 Massa unitária do agregado graúdo

A determinação da massa unitária seguiu a norma NBR 45 (ABNT, 2006), já utilizada para análise do agregado miúdo, desta forma, segue-se as mesmas etapas já descritas no item 3.2.2.2.

3.2.3.3 Massa específica do agregado graúdo

Para determinar a massa específica deste agregado foi feito uso da NBR NM 53 (ABNT, 2009). Inicialmente, coletou-se aproximadamente 2 kg de amostra do agregado com Diâmetro Máximo Característico (DMC) até 12,5 mm, sendo posteriormente lavado para remoção de quaisquer finos ainda existente, por fim, a amostra foi seca em estufa.

Com o agregado seco, ele foi submergido em água por 24 horas, ao fim do período, sua superfície foi seca com um pano e pesado (massa saturada). Então, colocou-se esta amostra em um recipiente e o submergiu em um tanque com água,

ainda dentro do tanque, este recipiente foi pesado (massa em água). Por fim, o material foi seco em estufa e sua massa foi registrada (massa seca). Sua massa específica foi finalmente calculada com a Fórmula 5.

$$d = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (5)$$

Onde:

d – massa específica do agregado (g/cm^3)

m – massa da amostra seca em estufa (g)

m_s – massa da amostra em condição saturada (g)

m_a – massa da amostra em água (g)

3.2.3.4 Absorção de água do agregado graúdo

Com os procedimentos da norma NBR NM 53 (ABNT, 2009), descritos no item 3.2.3.3, calculou-se a absorção de água deste agregado. Este cálculo foi feito através da Fórmula 4.

3.2.4 PVC moído

O PVC moído foi disponibilizado pela Pevecerca 3JG, localizada na cidade de Araquari/SC. O material é proveniente do resíduo produzido durante a fabricação de tubos e perfis de PVC. Este material foi moído na própria indústria, de forma que não houve necessidade de nenhuma medida adicional, além da realização dos ensaios de caracterização. Na Figura 6 pode-se observar a aparência do PVC moído.

Figura 6 – Resíduo de PVC moído



Fonte: Do autor (2019).

3.2.4.1 Análise granulométrica do agregado reciclado

Pelo fato de não haver nenhuma norma específica para este tipo de agregado, seguiu-se a norma NBR 248 (ABNT, 2003), a mesma utilizada para determinação da granulometria do agregado miúdo, com isso, os passos seguidos são os mesmos descritos no item 3.2.2.1. Por fim, irá ter-se uma curva granulométrica para o agregado reciclado.

3.2.4.2 Massa unitária do agregado reciclado

A determinação da massa unitária seguiu as prescrições da norma NBR 45 (ABNT, 2006), já utilizada para análise do agregado miúdo, pois, não contamos com norma específica para este tipo de agregado. Com isso, foram seguidos os mesmos passos já descritos no item 3.2.2.2.

3.2.4.3 Massa específica do agregado reciclado

A massa específica do agregado reciclado foi determinada com uso da NBR NM 52 (ABNT, 2003), a mesma utilizada para determinação feita com o agregado miúdo, desta forma os procedimentos seguidos são os mesmos já informados no item 3.2.2.3.

3.2.6 Água de amassamento

A água utilizada no presente trabalho, é proveniente da rede pública de abastecimento de água, fornecida pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN). Esta água atende a NBR 15.900 (ABNT, 2009), que normatiza a água para amassamento de concreto, desta forma, não foi necessário nenhum tratamento adicional.

3.3 Determinação do traço

Para definir o traço a ser utilizado no presente trabalho, será utilizado o método empírico ABCP (Rodrigues, 1998). Segundo Sandoval, Couto e Toralles (2018), este método é mais adequado a pessoas com pouca experiência em processo de dosagem e proporciona uma grande agilidade na sua execução, visto que apenas são necessários os ensaios de caracterização dos materiais para a aplicação do método. Outro ponto levantado é o fato de que a dosagem feita pelo método ABCP apresenta resultados ótimos se comparados a outros métodos de dosagem.

Rodrigues (1998) define que inicialmente, sejam definidos alguns parâmetros de dosagem, estes parâmetros podem ser visualizados na Tabela 3 e foram obtidos segundo a NBR 6118 (ABNT, 2004).

Tabela 3 – Parâmetros de dosagem estabelecidos.

Parâmetros de dosagem		
f_{ck}	25,0	MPa
S_d (NBR 12655)	4,0	MPa
Abatimento	10,00 \pm 1	cm
Condição de exposição (NBR 6118)	Urbana	

Fonte: Adaptado de SANDOVAL, COUTO E TORALLES (2018, p. 186)

A resistência à compressão de dosagem aos 28 dias foi calculada com a Fórmula 6.

$$f_{c28} = f_{ck} + 1,65 \times S_d \quad (6)$$

Onde:

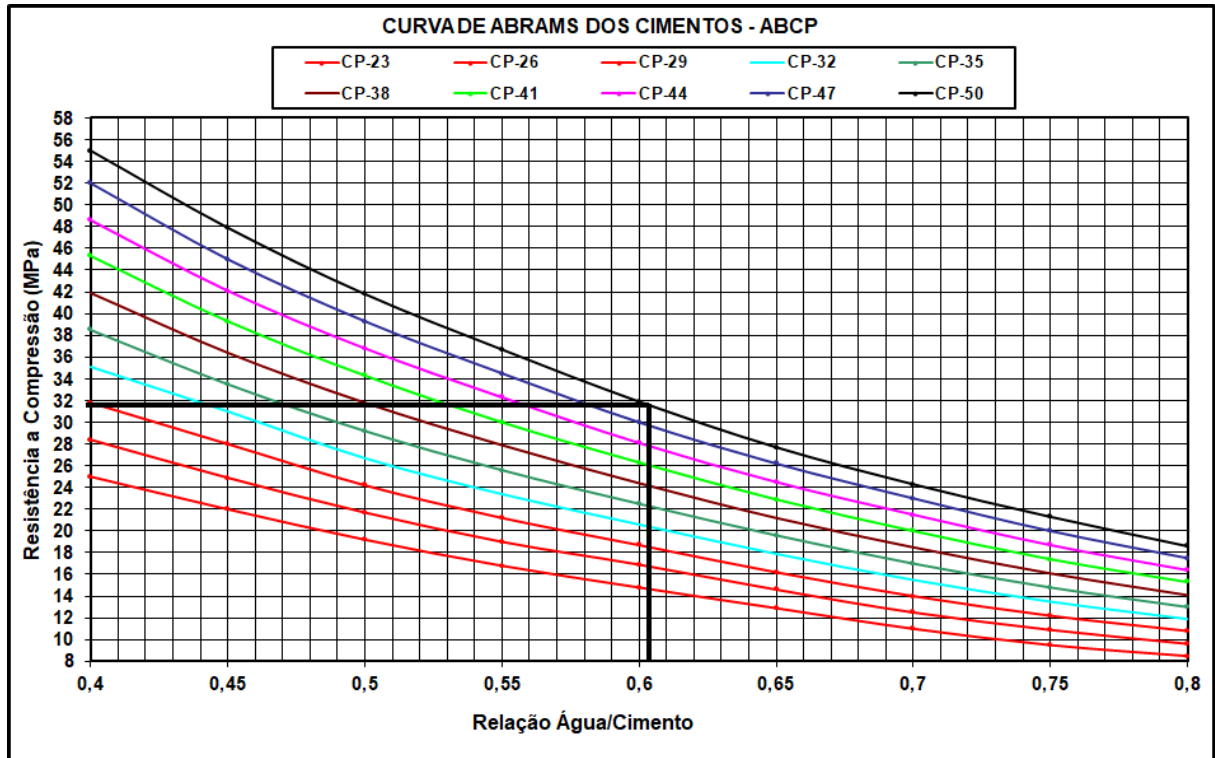
f_{c28} – resistência de dosagem aos 28 dias (MPa)

f_{ck} – resistência característica à compressão (MPa)

S_d – desvio padrão (MPa)

Desta forma, obteve-se uma resistência-alvo $f_{c28} = 31,6$ MPa, a partir da qual pode-se fixar a relação água/cimento (a/c), através do Gráfico 1.

Gráfico 1 – Curvas de Abrams para determinação da relação de água/cimento.



Fonte: Adaptado de SANDOVAL, COUTO E TORALLES (2018, p. 187)

A próxima etapa foi a determinação do Consumo de água (C_a) obtida na Tabela 4, com uso do DMC do agregado graúdo e o abatimento estabelecido na Tabela 3.

Tabela 4 – Consumo de água aproximado.

Consumo de água (L/m³)					
Abatimento (mm)	D _{máx} (mm)				
	9,5	19	25	31,5	37,5
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 120	230	205	200	195	190

Fonte: Adaptado de SANDOVAL, COUTO E TORALLES (2018, p. 187)

Em posse do consumo de água e da relação água/cimento, calculou-se o Consumo de Cimento (C), por meio da Fórmula 7.

$$C = \frac{Ca}{a/c} \quad (7)$$

Onde:

C – consumo de cimento (kg/m³)

Ca – consumo de água (L/m³)

a/c – relação água/cimento

Para estimar o consumo de agregado graúdo, utilizou-se o Volume compactado seco (Vc) para cada metro cubico, que é dado em função da sua Dimensão máxima (Dmáx) e do Módulo de Finura (MF) da areia, como visto na Tabela 5.

Tabela 5 – Volume compactado seco (Vc) de agregado graúdo para um metro cúbico de concreto.

Vc de agregado graúdo por metro cúbico de concreto.					
MF (da areia)	Dmáx (mm)				
	9,5	19	25	31,5	37,5
1,6	0,665	0,79	0,815	0,84	0,865
1,8	0,645	0,77	0,795	0,82	0,845
2	0,625	0,75	0,775	0,8	0,825
2,2	0,605	0,73	0,755	0,78	0,805
2,4	0,585	0,71	0,735	0,76	0,785
2,6	0,565	0,69	0,715	0,74	0,765
2,8	0,545	0,67	0,695	0,72	0,745
3	0,525	0,65	0,675	0,7	0,725
3,2	0,505	0,63	0,655	0,68	0,705
3,4	0,485	0,61	0,635	0,66	0,685
3,6	0,465	0,59	0,615	0,64	0,665

Fonte: Adaptado de SANDOVAL, COUTO E TORALLES (2018, p. 188)

Assim, o consumo de brita foi obtido com a Fórmula 8.

$$C_b = V_c \times \rho_c \quad (8)$$

Onde:

C_b – consumo de brita (kg/m^3)

V_c – volume compactado por m^3 de concreto (m^3/m^3)

ρ_c – massa unitária compactada do agregado graúdo

Para determinar o Consumo de agregado miúdo (C_m), primeiramente foi calculado o Volume de agregado miúdo (V_m) através da Fórmula 9.

$$V_m = 1 - \left(\frac{C}{d_c} + \frac{C_b}{d_b} + \frac{C_a}{d_a} \right) \quad (9)$$

Onde:

V_m – volume do agregado miúdo por m^3 de concreto (m^3/m^3)

C – consumo de cimento (kg/m^3)

C_b – consumo de brita (kg/m^3)

C_a – consumo de água (L/m^3)

d_c – massa específica do cimento

d_b – massa específica da brita

d_a – massa específica da água

Com o valor de V_m foi aplicada na Fórmula 10, para se obter o C_m .

$$C_m = V_m \times d_m \quad (10)$$

Onde:

C_m – consumo de agregado miúdo (kg/m^3)

V_m – volume do agregado miúdo por m^3 de concreto (m^3/m^3)

d_m – massa específica do agregado miúdo

Com todos estes consumos de materiais, fez-se a determinação do traço, utilizando-se da Fórmula 11, para relacionar os diferentes materiais em relação ao cimento.

$$1: \frac{C_m}{C}: \frac{C_b}{C}: a/c \quad (11)$$

Onde:

C – consumo de cimento (kg/m^3)

C_m – consumo de agregado miúdo (kg/m^3)

C_b – consumo de brita (kg/m^3)

a/c – relação água/cimento

Este traço foi utilizado como referência para a comparação com os demais traços desenvolvidos. A partir deste traço foram determinados os traços com substituição por agregado reciclado nas porcentagens de 5%, 10% e 15%, fazendo sua troca em função do volume de agregado miúdo, desta forma, levando sua massa específica e unitária em consideração.

3.4 Ensaios no estado fresco

3.4.1 Ensaio de abatimento tronco de cone - *slump test*

A consistência do concreto estudado foi analisada através do ensaio de abatimento de cone, o qual, é regido pela norma NBR NM 67 (ABNT, 1998). A norma padroniza o processo de realização do ensaio, que consiste em colocar o concreto em um molde cônico, apoiado sobre uma placa metálica. Na sequência, o concreto deve ser inserido no cone em três camadas iguais de forma a encher o molde, cada uma destas camadas deve ser golpeada 25 vezes com uma haste metálica e ao final retira-se o excesso de concreto. Após, remove-se o cone e o coloca-se invertido, com a base maior para cima, sobre a placa, então devemos apoiar a haste sobre o cone e medir a diferença entre a haste e o concreto, esta medida é o abatimento do concreto.

3.5 Ensaaios no estado endurecido

3.5.1 Resistência à compressão

A principal característica do concreto é sua resistência à compressão, a qual foi avaliada neste trabalho através do ensaio de ruptura à compressão, que atente as instruções da NBR 5739 (ABNT, 2018).

Inicialmente foram moldados corpos de prova (CP), de 100mm de diâmetro por 200mm de altura, conforme as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2015), que indica a aplicação de desmoldante nos moldes para depois preencher com o concreto fresco em duas camadas, as quais devem ser compactadas com 12 golpes cada.

Após, estes CP foram colocados em uma câmara úmida, para garantir seu correto processo de cura, e lá permaneceram pelo período necessário para obtenção dos resultados. Para este trabalho os CP tiveram idades de 7, 14 e 28 dias, sendo 3 amostras por traço utilizado.

Após a cura destes corpos de prova, eles tiveram suas bases retificadas e foram colocados em uma prensa hidráulica, que aplicou uma carga a velocidade constante até o rompimento da amostra. A prensa registrou a carga total que foi carregada até a ruptura e forneceu a tensão em Mpa.

3.5.2 Absorção e índice de vazios

A durabilidade de um concreto está completamente ligada à sua absorção, visto que quanto mais fácil for a penetração de água e outros agentes contaminantes, menos durável este concreto será. Para isso foi utilizada a norma NBR 9778 (ABNT, 2005) para analisar a absorção do concreto. Inicialmente foram moldados 3 corpos de prova conforme prescrito no item 3.5.1 os quais foram curados até uma idade de 28 dias. Quando a cura foi finalizada, os CP foram secos em estufa a 105 °C por 72 horas, tomou-se o registro de sua massa e após, eles foram submergidos por um período de 72 horas, em água na temperatura ambiente. Ao termino do período, mediu-se a massa dos CP e, por fim, os submeteu a um processo de fervura, por 5 horas, e novamente, anotou-se sua massa saturada e submersa em água.

A absorção de água foi calculada com uso da Fórmula 12.

$$A = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (12)$$

Onde:

A – absorção de água (%)

m_s – massa da amostra seca em estufa (g)

m_{sat} – massa da amostra em condição saturada (g)

O índice de vazios foi calculado com a Fórmula 13.

$$I_v = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_{\text{sat}} - m_f} \times 100 \quad (13)$$

Onde:

I_v – índice de vazios (%)

m_s – massa da amostra seca em estufa (g)

m_{sat} – massa da amostra em condição saturada (g)

m_f – massa da amostra em condição submersa (g)

3.5.3 Resistência à tração por compressão diametral

A determinação da resistência à tração por compressão diametral foi executada com o auxílio das indicações da norma NBR 7222 (ABNT, 2011). Para este teste foram produzidos corpos de prova conforme já descrito no item 3.5.1 deste trabalho. Foram moldados 3 CP por traço, os quais foram rompidos aos 28 dias. Então, estes CP foram colocados em posição horizontal sob a prensa hidráulica e foram efetuados apoios conforme a especificação da norma, para garantir o posicionamento da amostra. Por fim, a prensa aplicou uma carga crescente até a ruptura do material e desta forma, forneceu o valor de resistência à tração por compressão diametral em MPa.

3.5.4 Absorção de água por capilaridade

Para analisar a absorção de água por capilaridade foi realizado o ensaio previsto na norma NBR 9779 (ABNT, 2012). Para esta prática foram moldados 3 corpos de prova por traço, seguindo as determinações descritas no item 3.5.1. Estas amostras foram secas em estufa, a temperatura de 105 °C durante 24 horas, depois disso, os CP devem foram resfriados e pesados. Em seguida os corpos de prova foram alocados em um recipiente com uma lamina de água de aproximadamente 5mm de espessura. Durante o teste tomou-se o registro da massa destes CP em períodos de 3, 6, 12, 24, 48, e 72 horas. Posteriormente, calculou-se a absorção de água por capilaridade com o uso da Fórmula 14.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S} \quad (14)$$

Onde:

C – absorção de água por capilaridade (g/cm^2)

m_{sat} – massa saturada do corpo de prova (g)

m_s – massa do corpo de prova seco (g)

S – área da seção transversal (cm^2)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo do trabalho busca apresentar os resultados obtidos na execução dos ensaios descritos anteriormente no item 3, bem como, expor algumas discussões e comparações.

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Cimento

Com o uso da NBR 16605 (ABNT, 2017) foi encontrada uma massa específica de 2,92 g/cm³ para o cimento Portland CP V – ARI utilizado no ensaio. Resultado este que está dentro dos padrões estabelecidos que são entre 2,8 e 3,2 g/cm³, conforme informado pela Itambé, fabricante deste material (ITAMBÉ, 2016).

4.1.2 Agregado miúdo natural

O primeiro ensaio realizado com o agregado miúdo natural foi a determinação da composição granulométrica, executado seguindo as prescrições da NBR 248 (ABNT, 2003) e a NBR 7211 (ABNT, 2009) foi utilizada para analisar sua aceitação como constituinte para concretos.

Na Tabela 6 encontram-se os resultados para o ensaio de granulometria do agregado miúdo natural e com estes resultados, gerou-se o Gráfico 2, onde está apresentada a curva granulométrica deste material. O módulo de finura encontrado

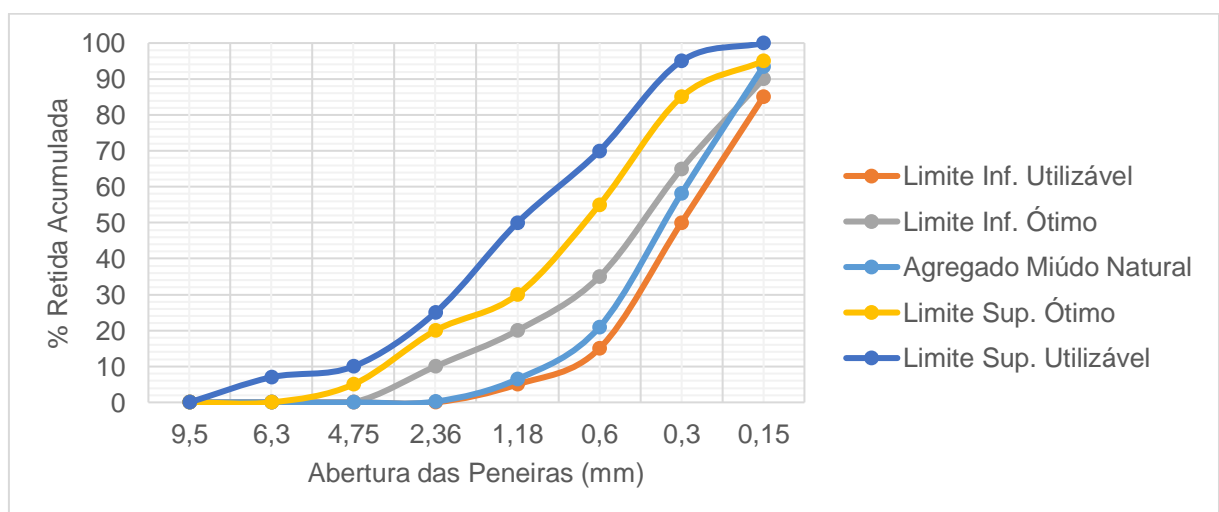
para esta areia é de 1,79 que, segundo a classificação de Ambrozewicz (2012), seria de uma areia muito fina, onde seu módulo de finura varia entre 1,35 e 2,25. Segundo classificação da NBR 7211 (ABNT, 2009) este agregado encontra-se dentro da zona utilizável inferior, onde o MF deve estar entre 1,55 e 2,20.

Tabela 6 – Propriedades granulométricas do agregado miúdo natural

Peneiras		Material retido em gramas	% Retida	% Retida acumulada
Número	mm			
3/8"	9,5	0,0	0,00	0,00
1/4"	6,3	0,0	0,00	0,00
4	4,75	0,0	0,00	0,00
8	2,36	2,0	0,22	0,22
16	1,18	55,7	6,23	6,46
30	0,6	129,5	14,48	20,94
50	0,3	332,5	37,20	58,15
100	0,15	316,0	35,36	93,50
Fundo	<0,15	58,1	6,50	100,00
Total		893,7	100,00	179,27
Módulo de Finura (MF):				1,79
Diâmetro Máximo Característico (DMC):				2,36

Fonte: Do autor (2019)

Gráfico 2 – Curva granulométrica do agregado miúdo natural



Fonte: Do autor (2019)

Em seguida foi determinada a massa unitária do agregado miúdo natural, utilizando-se das instruções contidas na norma NBR 45 (ABNT, 2006), onde foi encontrado um valor de $1687,31 \text{ kg/m}^3$, sendo esse semelhante ao resultado de 1633 kg/m^3 obtido por Castro (2018) ao utilizar o mesmo material disponibilizado pelo laboratório.

A determinação seguinte foi a de massa específica do agregado miúdo natural, com auxílio da norma NBR NM 52 (ABNT, 2003), através da qual obteve-se o valor de $2603,54 \text{ kg/m}^3$, resultado compatível com os 2614 kg/m^3 encontrados por Sartori (2018) para esta areia disponibilizada pelo LATEC.

O último ensaio realizado com este material foi a determinação da absorção de água, no qual foi utilizada a NBR NM 30 (ABNT, 2001), desta forma, apurou-se um resultado de 3,49%, valor não muito distante dos 4,1% encontrados por Castro (2018), ao analisar este agregado no LATEC.

4.1.2 Agregado graúdo natural

De mesma forma como realizado com o agregado miúdo, a determinação da granulometria do agregado graúdo foi obtida seguindo as prescrições da NBR 248 (ABNT, 2003) e a NBR 7211 (ABNT, 2009) também, foi utilizada na análise de sua aceitação como agregado do concreto.

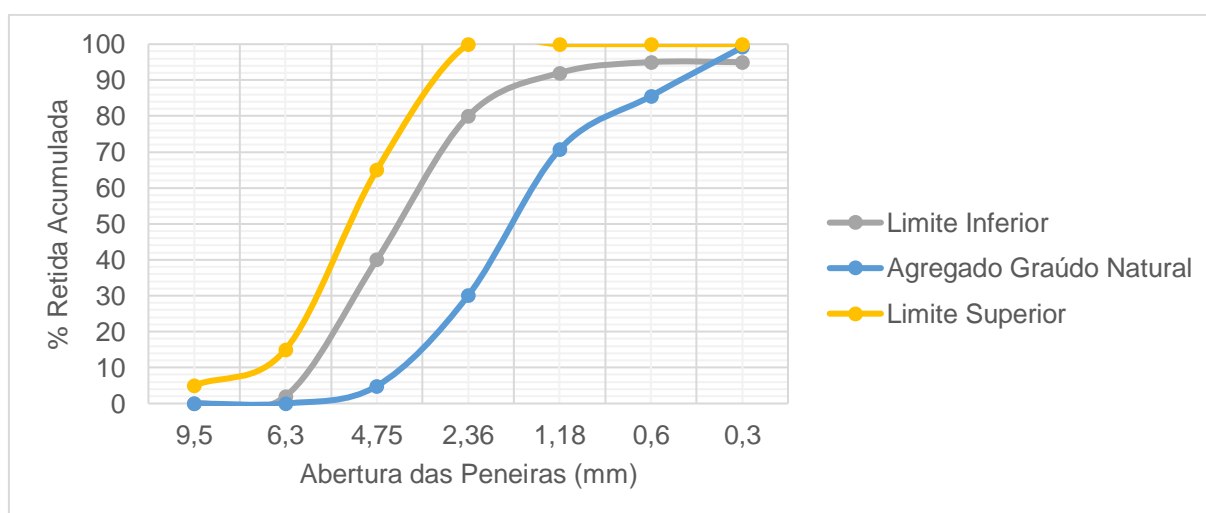
Na Tabela 7 podem ser vistos os resultados para o ensaio de granulometria do agregado graúdo natural e a partir destes resultados, pode-se gerar o Gráfico 3, que apresenta a curva granulométrica do agregado graúdo. O diâmetro máximo característico encontrado é de 9,5mm que, segundo a classificação de Ambrozewicz (2012), é compatível com uma brita 0. Ao se observar o Gráfico 3, percebe-se que o material se encontra fora dos limites estabelecidos na NBR 7211 (ABNT, 2009), porém o material é bem graduado, conforme descrição de Farias e Palmeira (2012), tendo apenas um módulo de finura relativamente baixo, algo esperado para um brita 0.

Tabela 7 – Propriedades granulométricas do agregado graúdo natural

Peneiras		Material retido em gramas	% Retida	% Retida acumulada
Número	mm			
1"	25	0,0	0,00	0,00
3/4"	19	0,0	0,00	0,00
1/2"	12,5	85,0	4,86	4,86
3/8"	9,5	440,0	25,18	30,04
1/4"	6,3	710,0	40,63	70,67
4	4,75	260,0	14,88	85,55
8	2,36	237,5	13,59	99,14
Fundo	<2,36	15,0	0,86	100,00
Total		1.747,5	100,00	214,74
Módulo de Finura (MF):				2,15
Diâmetro Máximo Característico (DMC):				9,5

Fonte: Do autor (2019)

Gráfico 3 – Curva granulométrica do agregado graúdo natural



Fonte: Do autor (2019)

A segunda determinação foi a massa unitária do agregado graúdo natural, na qual, também foi utilizado as instruções contidas na norma NBR 45 (ABNT, 2006), chegando a um valor de 1547,11 kg/m³, que é muito semelhante aos 1568 kg/m³ obtido por Silva (2018) em sua análise para o mesmo material.

A determinação de massa específica do agregado graúdo natural foi feita com uso da norma NBR NM 53 (ABNT, 2009), obtendo-se o valor de 2376,19 kg/m³,

resultado semelhante aos 2530 kg/m³ encontrados por Giovanaz (2018) para esta brita disponibilizada pelo LATEC.

Por fim, foi determinada a absorção de água, na qual foi utilizada a NBR NM 53 (ABNT, 2009) a qual, forneceu o resultado de 0,87%, exatamente o mesmo valor encontrado por Castro (2018), para este mesmo agregado do LATEC.

4.1.3 Agregado miúdo reciclado

A análise granulométrica do agregado miúdo reciclado foi executada conforme a normativa NBR 248 (ABNT, 2003), com auxílio da NBR 7211 (ABNT, 2009) para obtenção de parâmetros de aceitação para fazer parte do concreto.

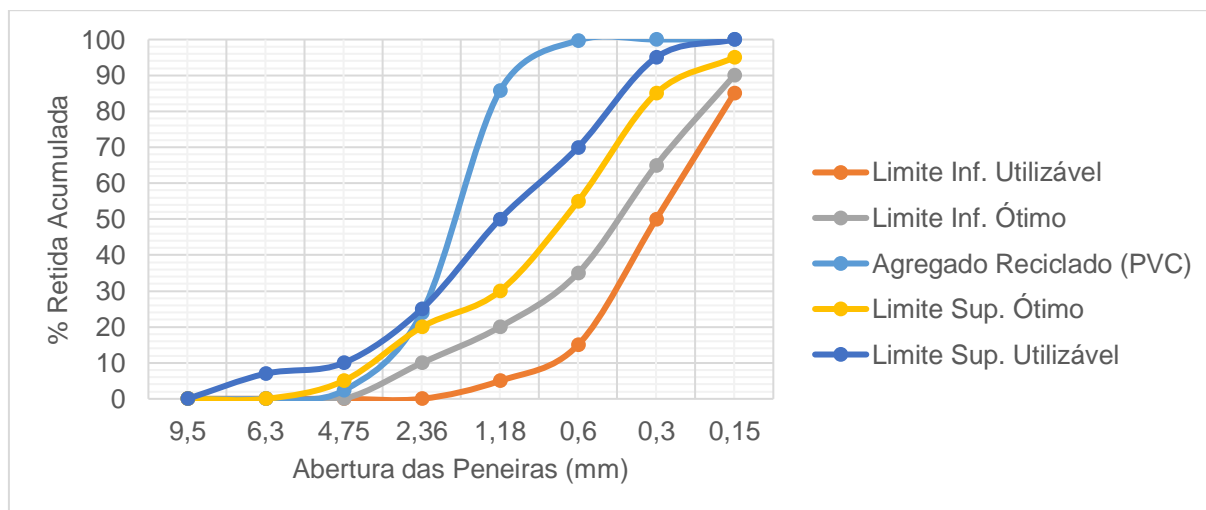
Os resultados para o ensaio de granulometria deste agregado reciclado podem ser observados na Tabela 8, resultados estes que proveram o Gráfico 4, que traz a curva granulométrica do agregado miúdo reciclado. O módulo de finura obtido para este agregado é de 4,12, valor muito semelhante aos 4,27 encontrados por Ferrari (2017) para PVC moído. Ao analisar o Gráfico 4, observa-se que o material tem uma graduação uniforme, que se justifica pelo fato da moagem criar grãos semelhantes entre si. O material está fora dos limites indicados pela NBR 7211 (ABNT, 2009), porém como a norma não apresenta parâmetros específicos para agregados reciclados, pode-se aceitá-lo com essa configuração granulométrica.

Tabela 8 – Propriedades granulométricas do agregado miúdo reciclado

Peneiras		Material retido em gramas	% Retida	% Retida acumulada
Número	mm			
3/8"	9,5	0,0	0,00	0,00
1/4"	6,3	0,0	0,00	0,00
4	4,75	7,3	2,32	2,32
8	2,36	67,5	21,61	23,93
16	1,18	193,0	61,81	85,74
30	0,6	43,7	14,00	99,74
50	0,3	0,8	0,26	100,00
100	0,15	0,0	0,00	100,00
Fundo	<0,15	0,0	0,00	100,00
Total		312,15	34,93	411,74
Módulo de Finura (MF):				4,12
Diâmetro Máximo Característico (DMC):				4,75

Fonte: Do autor (2019)

Gráfico 4 – Curva granulométrica do agregado miúdo reciclado



Fonte: Do autor (2019)

A massa unitária do agregado miúdo reciclado foi determinada com uso da norma NBR 45 (ABNT, 2006), obtendo valor de 532,07 kg/m³, valor muito próximo aos 546 kg/m³ observados Kou et al (2009), ao analisar PVC moído a partir de resíduos de tubos.

A norma NBR NM 52 (ABNT, 2003) foi utilizada para chegar-se ao resultado de massa específica para o agregado miúdo reciclado, desta forma, foi encontrado o valor de 1298,70 kg/m³, resultado compatível com os 1400 kg/m³ encontrados por Kou et al (2009) para sua análise com resíduos de PVC.

A absorção de água para este material é considerada nula, pelo fato do PVC ser um polímero não hidróscópico, ou seja, não absorve água ou umidade, fato este que também foi apontado por Kou et al (2009).

4.2 Definição do traço

Com o uso das prescrições do método ABCP desenvolvido por Rodrigues (1998), das recomendações feitas por Sandoval, Couto e Toralles (2018) e com os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais empregados, pôde-se aplicar os processos descritos no item 3.3 deste trabalho. Deste modo, chegou-se no traço observado no Quadro 4.

Quadro 4 – Traço de referência

Traço	Cimento	Areia	Brita	a/c	1:m	C (kg/m ³)
Proporção em volume	1	1,60	2,62	0,605	1 : 4,22	380,2

Fonte: Do autor (2019).

A partir deste traço foram definidos mais três traços, onde o volume de agregado miúdo natural fora substituído por PVC moído nas proporções de 5%, 10% e 15%. Nestes traços foi necessário a adição do aditivo superplastificante Grace Tec Flow 8000A, disponibilizado pelo LATEC, para que o abatimento estipulado no método fosse atingido, sem modificar a relação água/cimento, assim, buscando evitar alterações na sua resistência. Também foram feitas algumas correções nos consumos de materiais em relação a suas massas específicas. Os consumos em massa, bem como a porcentagem de aditivo adicionada podem ser observados no Quadro 5.

Quadro 5 – Traços utilizados na produção do concreto, com seu consumo em massa

Identificação	Traço unitário 1 : 4,22			Consumo total de materiais em kg						
	Cimento (kg)	Agregado miúdo (kg)	Agregado graúdo(kg)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	PVC (kg)	a/c	Água (kg)	Aditivo Superplast. (%)
Traço referência	1	1,6	2,62	10,50	16,80	27,55	0,00	0,605	6,35	0
Traço 5% PVC	1	1,6	2,62	10,39	15,79	27,26	0,83	0,605	6,28	0,92%
Traço 10% PVC	1	1,6	2,62	10,28	14,81	26,98	1,65	0,605	6,22	1,35%
Traço 15% PVC	1	1,6	2,62	10,17	13,84	26,70	2,44	0,605	6,15	1,91%

Fonte: Do autor (2019).

Na posse destes dados foram moldados 72 CP segundo a normativa NBR 5738 (ABNT, 2015), já previamente descrita no item 3.5.1. Destes 72 CP, foram executados 18 por cada um dos 4 traços, dos quais, 9 foram rompidos por compressão, sendo 3 aos 7 dias, 3 aos 14 e outros 3 aos 28 dias. Dos 9 CP restantes, foram curados até a idade de 28 dias, onde 3 foram rompidos por compressão diametral, outros 3 utilizados no ensaio de absorção de água e índice de vazio e os últimos 3, para a determinação da absorção por capilaridade.

4.3 Ensaio do concreto em estado fresco

4.3.1 Ensaio de abatimento do tronco de cone – *slump test*

O primeiro ensaio realizado com o concreto, ainda em seu estado fresco foi o teste de abatimento do tronco de cone, também conhecido por *slump test*. Este ensaio teve o objetivo de equiparar os diferentes traços, pois para o método ABCP o abatimento é uma das características utilizadas determinar a dosagem. Desta forma temos a trabalhabilidade e a água/cimento fixados, sendo utilizado o aditivo superplastificante com objetivo de corrigir o abatimento até a trabalhabilidade estipulada. A Quadro 6 apresenta um comparativo entre o abatimento final em relação a quantidade de aditivo utilizada.

Quadro 6 – Comparação do uso de aditivo com o abatimento encontrado

Identificação	Aditivo superplastificante (%)	Abatimento (mm)
Traço referência	0	90
Traço 5% PVC	0,92%	90
Traço 10% PVC	1,35%	100
Traço 15% PVC	1,91%	100

Fonte: Do autor (2019).

Esta necessidade pelo acréscimo de aditivo superplastificante se relaciona à perda de abatimento com aumento da substituição do agregado natural pelo reciclado, como já havia sido observado por Jardim (2016). Modro (2008) em sua pesquisa chegou a abatimento 0 para substituições mais altas, ao utilizar PET como agregado reciclado, porém indica que parte desta perda pode ser proveniente da forma do material utilizado.

Já Pietrobelli (2010), ao substituir o agregado miúdo por PET encontrou perdas de trabalhabilidade mais próximas as encontradas neste trabalho, sendo facilmente corrigidas com o uso de aditivos. Segundo ele, o concreto menos trabalhável obtido com este agregado se explica pelo fato que o agregado reciclado possui maior volume e menor peso ao se comparar ao agregado natural.

Na Figura 7, pode-se analisar a diferente consistência de cada um dos traços, bem como seu abatimento. Nesta imagem percebe-se que com a crescente substituição do agregado miúdo, começa a ocorrer uma segregação de material, isto se deve à falta de argamassa na mistura.

Figura 7 – Comparação do abatimento



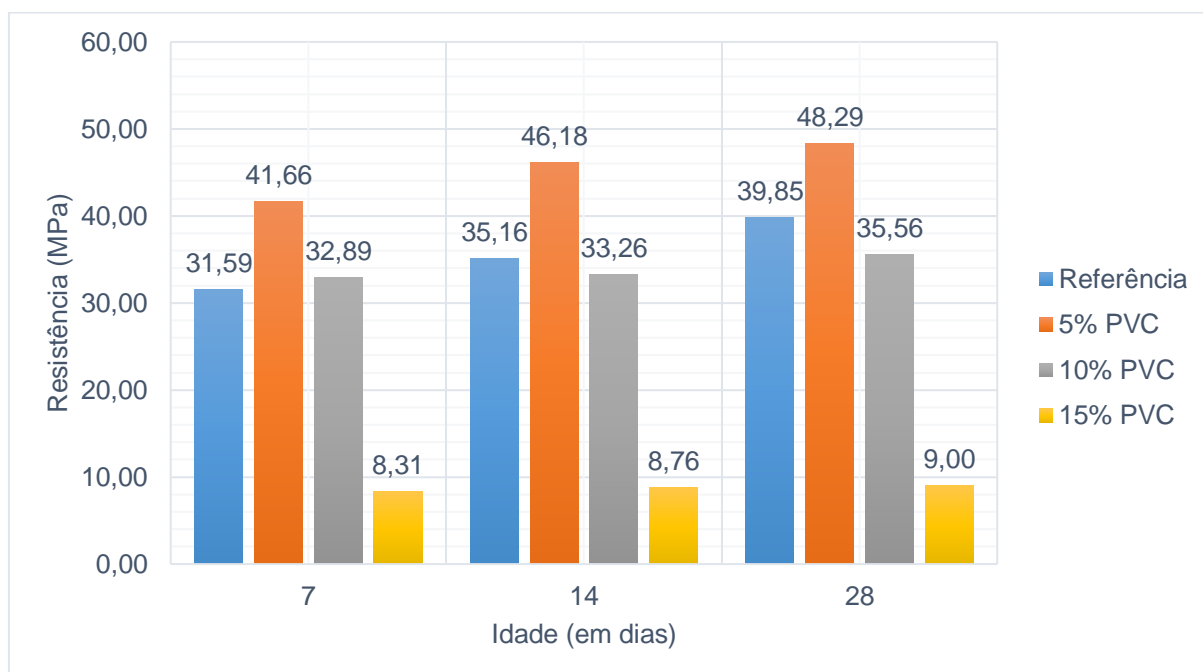
Fonte: Do autor (2019).

4.4 Ensaio do concreto em estado endurecido

4.4.1 Resistência à compressão

Na Gráfico 5, estão apresentados os resultados das médias de resistência à compressão dos corpos de provas do concreto de referência, bem como, dos traços com substituição. No Apêndice A, podem ser vistos todos os resultados para cada um dos CP rompidos.

Gráfico 5 – Resistência à compressão x idade de rompimento



Fonte: Do autor (2019)

O Gráfico 5 mostra que, como já era esperado, houve aumento da resistência entre as idades de controle (7→14→28 dias) para todos os traços. Tanto o concreto de referência quanto os concretos com substituição de 5% e 10% alcançaram resistências superiores aos 31,6 MPa estipulados para os 28 dias, na definição do traço. Sendo o Traço com 15% de PVC o único a não atingir a resistência mínima. Os resultados para este traço foram muito inferiores aos esperados, porém tal conclusão não surpreende, quando se analisa a Figura 7, sendo que esta mostra a segregação do material. Deste modo, acredita-se que este resultado possa ser evitado com uma correção no traço, evitando a falta de argamassa no concreto.

O resultado para o traço com 5% de substituição foi o que obteve melhor desempenho dentre os analisados, ficando com um aumento de 21,2 % na resistência se comparado ao concreto de referência, sendo que ao se comparar com outras pesquisas realizadas com o mesmo material, como a de Kou et al (2009), tem-se um padrão de queda na resistência com esta substituição. Porém fato que pode ser explicado pela diferente granulometria do material, que somado com a areia, preenche

melhor os vazios dentro do concreto, aumentando o empacotamento de partículas do conjunto.

Os resultados apontados por Ferrari (2017), para uma substituição com 10% de agregado miúdo por PVC moído, seriam de uma diminuição de 11,6% na resistência à compressão aos 28 dias se comparados ao concreto de referência. Estes resultados são compatíveis com os encontrados nesta pesquisa, onde para este traço teve-se uma redução de 10,7% na resistência, para a mesma comparação.

Na análise da resistência a compressão a substituição da areia por PVC se mostrou viável, para as porcentagens de 5% e 10%, sendo que ambas superaram a resistência de projeto. A substituição com 15% não se mostrou adequada para o uso em concretos neste trabalho, porém mais estudos devem ser realizados para efetivar tal conclusão.

4.4.2 Absorção e índice de vazios

Os valores médios de absorção de água e índice de vazios podem ser vistos na Tabela 9, onde também está indicada a comparação entre os valores do traço de referência e os traços com substituições. Todos os resultados para cada corpo de prova, se encontram no Apêndice B.

Tabela 9 – Absorção de água e índice de vazios

Traço	Absorção de Água (%)	Relação Concreto Referência/Concreto com substituição	Índice de Vazios (%)	Relação Concreto Referência/Concreto com substituição
Referência	4,09	1,00	9,29	1,00
5% PVC	3,20	0,78	7,47	0,80
10% PVC	4,81	1,18	10,79	1,16
15% PVC	9,06	2,22	18,75	2,02

Fonte: Do autor (2019)

Os resultados obtidos para este ensaio são totalmente compatíveis com os resultados encontrados para o ensaio de resistência à compressão visto em 4.4.1, de

forma que quanto menor o índice de vazios e, conseqüentemente, a absorção de água, maior a resistência resultante.

A variação do índice de vazios entre o concreto de referência e os traços com substituição, se assemelha muito com a variação da absorção de água para esta mesma comparação, onde fica visível a relação direta entre as duas propriedades.

Almeida (2016) indica que mesmo que a absorção do PVC seja nula, o que seria um ponto positivo para a substituição, este na verdade é seu maior problema, haja vista que a falta de absorção de água dificulta a interação entre a matriz cimentícia e o polímero. Este fenômeno pôde ser observado nos traços com 10% e 15% de agregado reciclado.

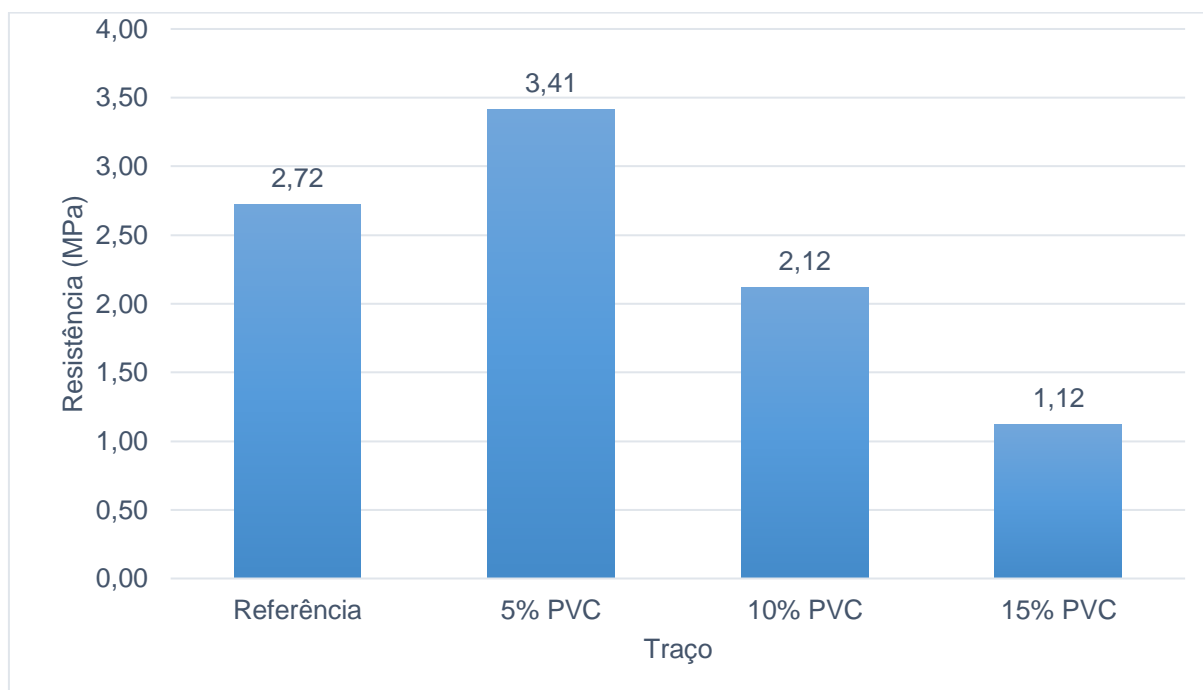
Já no traço com 5% de PVC, as partículas mais finas de PVC preencheram os espaços vazios, complementando a areia. Desta forma, o efeito a não absorção de água pelo PVC não foi fundamental para este resultado.

Sendo, desta forma, o traço com 5% de substituição o mais indicado, para atender a quesitos de absorção de água e índice de vazios.

4.4.3 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral para os quatro traços podem ser vistos no Gráfico 6, onde estão representados seus valores médios, todos resultados para cada corpo de prova podem ser observados no Apêndice C.

Gráfico 6 – Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias



Fonte: Do autor (2019)

Ao comparar os valores encontrados para este ensaio, percebe-se que houve um acréscimo 25,3% na resistência à tração do traço com 5% de PVC, se comparado ao traço de referência. Já no traço com 10% de substituição, ocorreu uma queda de 22,2% na resistência à tração, porém o pior resultado foi o do traço com 15% do agregado reciclado, onde teve-se uma diminuição de 58,9% em sua resistência.

Novamente, esta baixa resistência encontrada para o traço com 15% de PVC pode ser explicada pela segregação de materiais no processo de moldagem, algo que como visto no item 4.4.3, aumentou muito seu índice de vazio, desta forma, baixando sua resistência.

O traço com 10% de agregado reciclado teve uma queda de 22,2% em relação ao concreto de referência, similar aos 18,4% encontrados por Kou et al (2009), que relacionou essa perda de resistência ao fato de que o PVC por não absorver água, dificulta a adesão da matriz cimentícia, e desta forma, enfraquece a zona de transição, região que compreende a interface entre a pasta e a superfície do agregado, onde se inicia a ruptura.

Já o aumento da resistência à tração vista no traço com 5% do PVC, segundo Jardim (2016), está associado ao fato de que as partículas de PVC podem assumir um papel semelhante ao observado nas adições de fibras no concreto, fornecendo assim, um elevado ganho de resistência à tração.

No que se refere a resistência à tração, apenas o traço com substituição de 5% se mostrou efetivo quando comparado ao concreto convencional. Sendo os traços com 10% e 15% de PVC, considerados não apropriados para este uso, até que se realizem novas pesquisas sobre o tema.

4.4.4 Absorção de água por capilaridade

Na Tabela 10, estão expostos os valores médios para os resultados de absorção de água por capilaridade para 3h, 6h, 12h, 24h, 48h e 72h. Também está apresentada uma comparação entre o traço de referência e os demais traços para cada uma das medições. Os resultados para cada um dos corpos de prova podem ser visualizados no Apêndice.

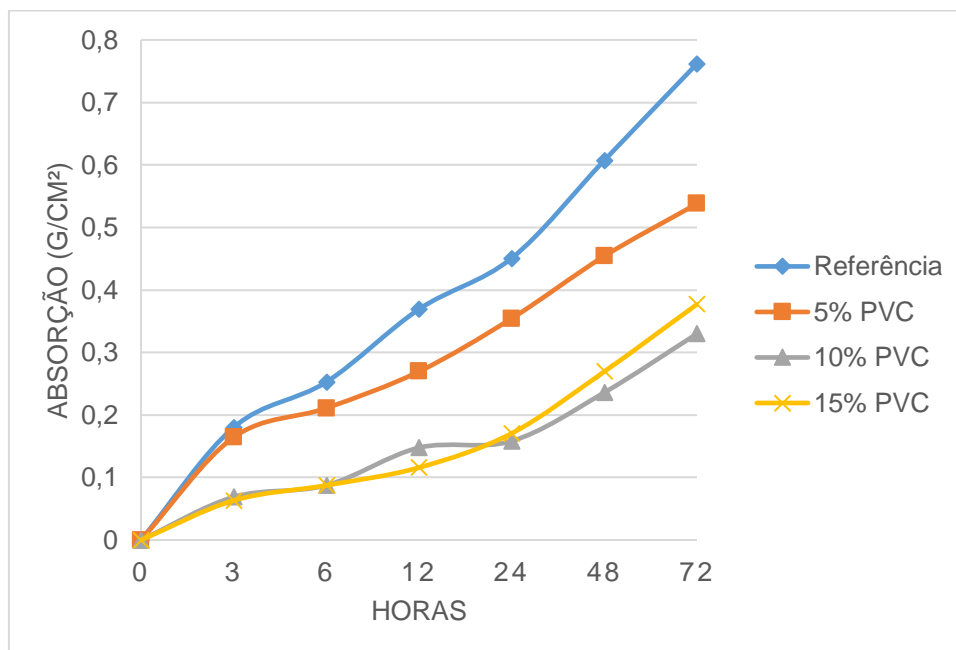
Tabela 10 – Absorção de água por capilaridade

Traço	Aborção de Água 3h (g/cm ²)	Relação Concreto Refência/Concreto com substituição	Aborção de Água 6h (g/cm ²)	Relação Concreto Refência/Concreto com substituição
Referência	0,18	1,00	0,25	1,00
5% PVC	0,16	0,91	0,21	0,83
10% PVC	0,07	0,38	0,09	0,35
15% PVC	0,06	0,35	0,09	0,35
Traço	Aborção de Água 12h (g/cm ²)	Relação Concreto Refência/Concreto com substituição	Aborção de Água 24h (g/cm ²)	Relação Concreto Refência/Concreto com substituição
Referência	0,37	1,00	0,45	1,00
5% PVC	0,27	0,73	0,35	0,79
10% PVC	0,15	0,40	0,16	0,35
15% PVC	0,12	0,31	0,17	0,38
Traço	Aborção de Água 48h (g/cm ²)	Relação Concreto Refência/Concreto com substituição	Aborção de Água 72h (g/cm ²)	Relação Concreto Refência/Concreto com substituição
Referência	0,61	1,00	0,76	1,00
5% PVC	0,45	0,75	0,54	0,71
10% PVC	0,24	0,39	0,33	0,43
15% PVC	0,27	0,44	0,38	0,49

Fonte: Do autor (2019)

Com estes dados pode-se gerar o Gráfico 7, que torna a visualização dos resultados muito mais clara, podendo-se observar a absorção de água através dos registros para cada idade.

Gráfico 7 – Absorção de água por capilaridade x tempo



Fonte: Do autor (2019)

Ao observar o Gráfico 7, tem-se um resultado inesperado, pois os traços com maiores porcentagens de substituição apresentam os menores níveis de absorção se comparados ao traço de referência, resultados estes incompatíveis com os que foram encontrados para absorção pelo método de imersão. Porém este fato pode ser explicado através da má ligação entre o polímero e a matriz cimentícia, fenômeno explicado por Almeida (2016). Esta má ligação entre os constituintes do concreto ocasiona uma segregação dos materiais, fazendo com que haja grande concentração de fino no fundo do corpo de prova. Como no ensaio de absorção de água por capilaridade, esta é feita pelo contato entre o fundo do corpo de prova e uma lâmina de água, entende-se que a camada formada por finos no fundo deste concreto impeça a absorção por capilaridade, sendo assim, estes resultados considerados irrealistas.

Já no concreto com 5% de substituição, temos uma absorção por capilaridade mais condizente com a realidade encontra nos outros ensaios, desta forma pode-se considerar este resultado válido.

5 CONCLUSÃO

Com base nas análises e resultados, onde se buscou avaliar a substituição do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado, obtido através da moagem de resíduos de PVC, nas proporções de 5%, 10% e 15%, na dosagem de um concreto convencional. Estão aqui apresentadas as conclusões finais deste trabalho, bem como sugestões para próximas pesquisas.

Inicialmente, deve-se citar que os resultados obtidos para o traço com 15% de PVC não foram os melhores possíveis, provavelmente em decorrência de algum erro no processo de definição do traço, tendo-se isto em visto, indica-se a realização de novos trabalhos com este material e traço, porém utilizando algum outro método de dosagem ou fazendo algumas correções no traço.

Para os resultados de resistência à compressão os concretos com 5% e 10% de agregado miúdo substituído por PVC foram aceitos com opção para concretos convencionais, pois superaram a resistência solicitada em projeto, sendo que o traço com 5% de agregado reciclado chegou a uma resistência de 48,29 MPa aos 28 dias, superando em 52,8% os 31,6 MPa estabelecidos para o projeto.

Já para resistência à tração, apenas o resultado obtido pelo concreto com 5% de PVC superou o concreto convencional. Este fato ocorreu devido ao efeito de que o PVC age como uma espécie de fibra dentro do concreto, desta forma melhorando sua resistência à tração.

Os finos presentes no resíduo de PVC foram cruciais para atingir um empacotamento ótimo no traço de 5% de substituição, desta forma diminuindo seu número de vazios e, conseqüentemente, sua absorção de água, fazendo que ambos os parâmetros fossem menores que os obtidos para o concreto de referência.

Observando nessas análises, é possível afirmar que a substituição de agregado miúdo natural por agregado reciclado de PVC é viável, enquanto as suas propriedades físicas e mecânicas. Sendo que os melhores resultados para esta substituição serão obtidos a partir do uso de 5% de PVC para o volume original de areia.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA BRASIL (São Paulo). **Produção de lixo no país cresce 29% em 11 anos, mostra pesquisa**. 2015. Elaborado por Camila Maciel. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2015-07/producao-de-lixo-no-pais-cresce-29-em-11-anos-mostra-pesquisa-da-abrelpe>>. Acesso em: 25 maio 2019.
- ALBUQUERQUE, Alexandre Serpa. Agregados. In: BAUER, Luiz Alfredo Falcão (Org.). **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2016. Cap. 4. p. 63-120.
- ALMEIDA, Salomão Pereira da. **Uso de politereftalato de etileno (pet) como agregado em peças de concreto para pavimento intertravado**. 119 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.
- ALLEN, Edward; IANO, Joseph. **Fundamentos da engenharia de edificações: materiais e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 996 p.
- AMBROZEWICZ, Paulo H. L. **Materiais de Construção**. São Paulo: Pini, 2012.
- ANDRADE, Jairo José de Oliveira. Propriedades dos Polímeros. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Materiais de Construção Civil: e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. Cap. 38. p. 1263-1291.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP (São Paulo). **Uma breve história do cimento Portland**. Disponível em: <<https://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>>. Acesso em: 20 abr. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5739**: Concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. – ABNT. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos -Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.
- _____. – ABNT. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. – ABNT. **NBR NM 67**: Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. – ABNT. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. – ABNT. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

_____. – ABNT. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. – ABNT. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro, 2009.

_____. – ABNT. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____. – ABNT. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. – ABNT. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

CAVALCANTI, Clóvis. Sustentabilidade da Economia: paradigmas alternativos de realização econômica. In: CAVALCANTI, Clóvis (Org.). **DESENVOLVIMENTO E NATUREZA**: Estudos para uma sociedade sustentável. Recife: INPSO/FUNDAJ, 1994. Cap. 9. p. 153-177.

CANEVAROLO, Sebastião Vicente. **Ciência dos Polímeros**: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006. 277 p.

CANTO, Eduardo Leito do. **Plástico**: bem supérfluo ou mal necessário?. São Paulo: Moderna, 1995. 88 p.

CARDOSO, A.; GALATTO, S.; GUADAGNIN, M. **Estimativa de Geração de Resíduos da Construção Civil e Estudo de Viabilidade de Usina de Triagem e Reciclagem**. Revista Brasileira De Ciências Ambientais, v.31. Criciúma, 2014.

CASTRO, Ricardo Hister de. **Estudo da adição de resíduos de construção e demolição em concreto não estrutural**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2018.

FARIAS, Márcio Muniz de; PALMEIRA, Ennio Marques. Agregados para a Construção Civil. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Materiais de Construção Civil**: e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: IBRACON, 2007. Cap. 16. p. 481-523.

FERRARI, Ana Karoliny. **Influência do resíduo de pvc moído como substituto parcial do agregado miúdo no concreto dosado para peças de pavimento intertravado**. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2017.

GELAIN, Guilherme Raphael dos Santos. **Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil**. 2014. 6 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Pós-graduação Oswaldo Cruz, São Paulo, 2014.

GIOVANAZ, Alfredo Henrique. **Análise da efetividade de métodos de reforço por encamisamento em pilares curtos de concreto**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2018.

HAGE JUNIOR, Elias. Aspectos históricos sobre o desenvolvimento da ciência e da tecnologia de polímeros. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 8, n. 2, p.6-9, abr. 1998.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Materiais de Construção Civil: e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. Cap. 27. p. 905-944.

INSTITUTO BRASILEIRO DO PVC. **Brasil recicla 17,1% de PVC pós-consumo**. Brasil. 2015. Disponível em: <<https://pvc.org.br/imprensa/releases/brasil-recicla-171-de-pvc-pos-consumo-outubro-2015>>. Acesso em: 01 maio 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DO PVC. **O que é PVC: A fabricação do PVC**. Brasil. Disponível em: <<https://pvc.org.br/o-que-e-pvc>>. Acesso em: 01 maio 2019.

ITAMBÉ. **Ficha de informações de segurança de produtos químicos - FISPQ**. Balsa Nova. 2016. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/wp-content/uploads/2018/06/inf_segur.pdf>. Acesso em: 15 set. 2019.

ITAMBÉ. **Relatório de ensaios de cimento**. Balsa Nova, 2015. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/wp-content/themes/itambe/_assets/pdf/relatorios/2013-13/CP-V-ARI.pdf>. Acesso em: 08 maio 2019.

JARDIM, Rosiéli Ribeiro. **Estudo da viabilidade da substituição parcial do agregado miúdo por agregado miúdo reciclado de pet em concretos convencionais**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

KOU, S.C., et al. **Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes**. *Waste Management*. Vol. 29, p. 621 – 628, 2009.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J.M.. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p.

MICHEREPE, Jorge. O Plástico na Construção. In: BAUER, Luiz Alfredo Falcão (Org.). **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2016. Cap. 23. p. 686-703.

MODRO, N.L.R.; OLIVEIRA, A.P.N. Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET. In: *Revista Matéria*. Vol. 14. Pág. 725 – 736. 2009.

MODRO, Neilson Luiz Ribeiro. **Desenvolvimento e caracterização de concreto de cimento Portland contendo resíduos poliméricos de PET**. 102 f. Dissertação

(Mestrado) - Curso de Engenharia de Processos, Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2008.

NETA, Antonia Sousa de Jesus. **Meio ambiente e gestão dos resíduos sólidos**: estudo sobre o consumo sustentável a partir da lei 12.305/2010. 2011. Disponível em: <http://www.ambitojuridico.com.br/site/index.php?n_link=revista_artigos_leitura&artigo_id=11291>. Acesso em: 27 abr. 2019.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J.. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 441 p.

PAES, Janiere Portela Leite. **ESTUDO SOBRE RESPONSABILIDADE AMBIENTAL**. 2011. Disponível em: <https://www.jurisway.org.br/v2/dhall.asp?id_dh=6273>. Acesso em: 27 abr. 2019.

PIETROBELLI, R. Eliton. **Estudo de viabilidade do Pet reciclado em concreto sob aspecto da resistência a compressão**. Monografia apresentada Universidade Comunitária Regional de Chapecó para o grau de bacharel em Engenharia Civil, Chapecó, 2010.

PIVA, Ana Magda; NETO, Miguel Bahiense; WIEBECK, Hélio. A Reciclagem de PVC no Brasil. **Polímeros**: Ciência e Tecnologia, São Carlos, v. 9, n. 4, p.195-200, out. 1999.

RODRIGUES, Públio Penna Firme. **Parâmetros de Dosagem do Concreto. ET – 67**. São Paulo: ABCP, 1998.

RODOLFO Jr., Antonio; NUNES, Luciano R.; ORMANJI, Wagner. **Tecnologia do PVC**. São Paulo: ProEditores/Braskem, 2002. 400 p.

SANDOVAL, Gersson Fernando Barreto; COUTO, Álisson Franco do; TORALLES, Berenice Martins. **Estudo comparativo de diferentes métodos de dosagem de concretos convencionais**. Revista de Engenharia e Tecnologia. v. 10 n.1, 2018.

SARTORI, João Marcos. **Estudo de viabilidade técnica de placas cimentícias para revestimento de fachadas produzidas com CPR baseadas no sistema GRC**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2018.

SILVA, Adilson Heleno da. **Avaliação de concreto com uso de RCD para aplicação em passeio público no município de Estrela-RS**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2018.

SILVA, Cesar Augusto Rodrigues da. **Estudo do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas**. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

TROIAN, Aline. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto**. 2010. 129 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

VIEIRA, Geilma Lima; DAL MOLIN, Denise Carpena Coutinho. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 4, n. 4, p. 47-63, dez. 2004.